

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

UNE APPROCHE PROSPECTIVE À LA GESTION INTÉGRÉE DES
DÉCHETS :
MODÉLISATION, RÉOLUTION ET APPLICATIONS

AGNÈS MARIE ASSUMPTA WIZERE
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES
ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(MATHÉMATIQUES DE L'INGÉNIEUR)
JUIN 1999



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-48898-5

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

UNE APPROCHE PROSPECTIVE À LA GESTION INTÉGRÉE DES
DÉCHETS :
MODÉLISATION, RÉOLUTION ET APPLICATIONS

présentée par : WIZERE Agnès Marie Assumpta
en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. SOUMIS François, Ph.D., président
M. SAVARD Gilles, Ph.D., membre et directeur de recherche
M. LANDEVIN André, Ph.D., membre
M. FRAGNIÈRE Emmanuel, Ph.D., membre externe

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée grâce à l'appui inestimable du professeur Gilles Savard qui en a encadré les travaux. La patience, la constante disponibilité et la rigueur scientifique dont il ne s'est jamais départi montrent l'estime qu'il mérite. Je le remercie aussi de tout coeur pour le support financier dont il m'a fait bénéficier.

Je saisis également l'occasion pour exprimer ma vive reconnaissance à monsieur Claude Berger qui a assuré la coordination du projet de recherche sur la gestion intégrée de déchets pendant trois ans. Sa franche collaboration m'a permis d'améliorer la qualité de ce travail. Je remercie, par la même occasion, Nadia Live, Kathleen Vaillancourt, Maxime Soucy, France Ratel et Moatez Ben Abdalah pour leur contribution dans ce projet. Ma gratitude s'adresse aussi à tous mes collègues et amis du GERAD, pour leurs multiples et fructueux échanges qui m'ont évité une perte de temps considérable. Je remercie en particulier Éric Rancourt, Ghada El Khayat, Jean Guérin, Salifou Seini Modi et Tsévi Vovor pour leurs remarques constructives qui m'ont permis d'améliorer la présentation de cette thèse.

Je garde avec estime les commentaires utiles de mes amies Grâce Massagbor, Espérance Ukunzarakura et Aline Ngarukiyintwali qui m'ont également permis d'améliorer la présentation de cette thèse.

Je remercie également messieurs François SOUMIS, André LANGEVIN et Emmanuel FRAGNIÈRE d'avoir accepté de faire partie du jury. J'éprouve une dette de reconnaissance à leur égard pour les remarques très constructives qu'ils ont formulées et qui ont contribué à l'amélioration de la qualité de ce travail.

Une note spéciale de remerciements s'adresse aux membres de ma famille, pour leurs encouragements et leur aide qui m'ont permis de persévérer. Enfin, je remercie de façon particulière mon mari Augustin Baziramwabo dont l'amour et l'appui m'ont été de grandes sources d'inspiration.

RÉSUMÉ

La planification de la gestion intégrée des déchets solides est une tâche d'une grande importance. De nos jours, elle constitue un problème extrêmement compliqué à cause, notamment, de la nécessité d'intégration des critères sociaux et environnementaux. Les sites d'enfouissement sanitaire sont qualifiés d'indésirables par les populations environnantes et comportent beaucoup de risques environnementaux à long terme tels que la pollution de l'atmosphère et des eaux sous-terraines. Ainsi, les gestionnaires se trouvent obligés de mettre l'emphasis sur des programmes de récupération, de recyclage et de valorisation des déchets. Cependant, les technologies de pointe requises pour une gestion de déchets respectueuse de l'environnement et des préoccupations sociales nécessitent une levée de fonds considérable dans un contexte économique précaire. Il est donc nécessaire d'utiliser une approche systémique pour avoir une vue globale afin de faire une analyse économique, technique, sociale et environnementale des différentes options.

L'objectif de ce travail est la conception d'un modèle d'optimisation minimisant le coût total d'un système local ou régional de gestion intégrée de déchets solides, en tenant compte des contraintes techniques ainsi que des contraintes environnementales. Le modèle, appelé *Eugène*, tient compte de la composition des déchets aux sources et de la demande en matières triées ou recyclées, en énergie et en compost. Les décisions relatives aux investissements concernant l'introduction de nouvelles technologies de collecte, de transport ou de traitement, ainsi que les décisions d'augmentation de capacités des technologies existantes font partie intégrante du modèle. Ceci rend le modèle plus complet que les modèles développés par le passé.

C'est le premier modèle qui intègre à la fois les coûts liés aux constructions des nouvelles installations pour traiter ou éliminer les déchets et les coûts liés aux changements dans les modes de collecte. Par la même occasion, les coûts de sensibilisation et d'achat de matériaux relatifs aux changements dans les modes de collecte sont pris en considération. Le modèle présente également d'autres innovations comme

la vocation multiple des sites potentiels, l'agrégation de matières venant des sources selon les modes de collectes utilisés et la prise en compte des modes opératoires des technologies.

Dans un premier temps nous expliquons la problématique en insistant sur les différentes étapes de la gestion intégrée des déchets et leurs interrelations. Dans un second temps, nous présentons la revue de la littérature tout en dressant un parallèle entre les modèles existants et le nôtre. Dans un troisième temps, nous donnons une description informelle suivie de la formulation mathématique de notre modèle.

Ensuite, nous parlons de la méthode de séparation et d'évaluation progressive utilisée pour la résolution. La règle de séparation et d'évaluation ainsi que les méthodes de résolution de la relaxation initiale et des sous-problèmes sont choisies selon les spécificités de notre modèle. La définition de deux coupes d'optimalité ainsi qu'un choix adéquat de l'ordre de priorité de branchement des variables binaires nous permettent d'améliorer considérablement le temps de résolution.

Enfin, nous présentons la base de données construite à partir des données réelles de la ville de Montréal. Une des caractéristiques importantes de cette base de données est le vaste choix de technologies de traitement et de modes de collectes qui s'y trouvent. Les paramètres techno-économiques ainsi que les indices environnementaux des technologies sont donnés. Nous présentons également des scénarios construits par fixation de certains paramètres de la base de données et nous analysons les résultats issus de ces scénarios. Ces résultats nous permettent de tirer des conclusions utiles concernant les enjeux économiques technologiques et environnementaux des contraintes sur la quantité totale enfouie pendant 20 ans sur l'île de Montréal.

ABSTRACT

Planning integrated solid waste management decisions is a very important task. Presently, it is made extremely complicated by social and environmental requirements. Landfill sites are qualified as unwanted by surrounding populations and involve long term environmental risks such as water and atmospheric pollution. Therefore, managers must focus on recovering, recycling and other waste valorization programs. But the introduction of technologies which respect both environmental and social requirements is very expensive. As a result, it is necessary to use a systemic approach to obtain a global view in order to analyze several alternatives, economically, environmentally, technically and socially.

The main goal of this study is to design an optimization model that minimizes the total cost of either a regional or local solid waste management system, taking into account technical as well as environmental constraints. The wide diversity of waste components generated and the market demand for sorted and recycled materials, energy and compost are considered. The investment costs of establishing new facilities or new collection methods as well as decisions to increase capacities of existing technologies form an integral part of this model. This makes our model more complete than those previously developed.

It is the first model which integrates both investment costs related to treatment technologies and investment costs related to collection methods. The costs of publicity and the costs of material needed for the new methods in solid waste collection are considered in this model. The model also presents other innovations compared to other models such as : a wide choice of technologies associated to each potential site, consideration of operating modes of technologies and accumulation of wastes coming from the sources based on collection methods used.

In this work, we first describe the various stages of integrated waste management and their relationship . Then we present an overview of the literature related to our

work and give an account of similarities and differences between the existing models and ours. An informal description of our model precedes the complete mathematical formulation.

The branch and bound method used in solving the problem is presented. The rules for branching and for evaluation, as well as solution methods for the relaxed subproblems are tailored to the specifics of our model. Two optimality cuts and appropriate choice of priority for the binary variables allows us to considerably improve on the solution time.

Finally, we present the data base constructed from for the city of Montreal. One of the important characteristics of this data base is the large number of choices of waste treatment technologies and collection methods included. Techno-economic parameters as well as environmental global indices for the technologies are given. We also present scenarios constructed by fixing certain parameters and we analyze the results obtained from those scenarios. This allows us to draw useful conclusions regarding the economical, technological and environmental implications of constraints on the total quantity of waste that will be buried in the next twenty years on the island of Montreal.

TABLE DES MATIÈRES

BIBLIOGRAPHIE	-17
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xvi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	10
2.1 La planification stratégique	10
2.1.1 Choix des sites d'enfouissement	11
2.1.2 Choix des sites de transfert et des sites d'enfouissement	11

2.1.3	Choix des unités de traitement	13
2.2	La planification tactique	18
2.3	Classification des modèles	20
2.4	Conclusion	24
CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DU MODÈLE		26
3.1	Le système de référence	27
3.1.1	Les sources	28
3.1.2	Les sites	31
3.1.3	Les marchés	39
3.2	Les investissements	40
3.2.1	Choix de combinaisons de collectes	40
3.2.2	Investissement dans les technologies	40
3.3	Les fonctions objectifs	42
3.3.1	Minimiser les coûts	42
3.3.2	Minimiser l'enfouissement	42
3.4	Le modèle	43
3.4.1	Les contraintes	44

3.4.2 Les objectifs	64
-------------------------------	----

CHAPITRE 4 STRUCTURE DU MODÈLE ET MÉTHODE DE RÉ- SOLUTION 71

4.1 Structure du modèle	71
-----------------------------------	----

4.2 Méthode de résolution : séparation et évaluation	73
---	----

4.2.1 Algorithme	74
----------------------------	----

4.3 Résultats comparatifs	76
-------------------------------------	----

4.3.1 Choix des noeuds et choix des variables	77
---	----

4.3.2 Résolution des problèmes linéaires : relaxation initiale et des sous-problèmes	78
---	----

4.4 Coupes et paramètres de priorité	79
--	----

4.4.1 Les coupes	80
----------------------------	----

4.4.2 Paramètres de priorités sur les variables binaires	84
--	----

4.4.3 La marge d'erreur	85
-----------------------------------	----

4.4.4 Conclusion	87
----------------------------	----

CHAPITRE 5 APPLICATION DU MODÈLE : ANALYSE DES STRA- TÉGIES PERMETTANT DE RÉDUIRE L'ENFOUISSEMENT SUR LE TERRITOIRE DE LA VILLE DE MONTRÉAL 88

5.1	La base de données	89
5.1.1	Les sources	89
5.1.2	Les modes de collecte	92
5.1.3	Les sites	97
5.1.4	Les technologies de traitement	99
5.1.5	Les marchés	107
5.1.6	Les indices environnementaux	108
5.2	Les scénarios	110
5.3	Les résultats	112
5.3.1	Les scénarios Base _*	113
5.3.2	Les scénarios Inc _*	118
5.3.3	Les scénarios IncTc _*	123
5.3.4	Les scénarios Env _*	125
5.3.5	Discussion des résultats	129
CONCLUSION		134
BIBLIOGRAPHIE		136

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Problème de localisation des sites d'enfouissement	21
2.2	Problème de localisation des sites de transfert	21
2.3	Problème de localisation des sites de transfert et des sites de traitement	22
2.4	Modèles stratégiques avec objectifs multi-critères	22
2.5	Modèles stratégiques utilisant des flots détaillés de matières	23
2.6	Modèles tactiques	23
4.1	Problèmes tests	77
4.2	Comparaison des règles de sélection et de séparation	78
4.3	Temps de résolution du <i>problème_10ans</i>	78
4.4	Comparaison des méthodes de résolution des problèmes relaxés	79
4.5	Choix de méthodes de résolution du sous-problème	79
4.6	Évaluation des coupes	84
4.7	Évaluation des paramètres de priorité	85
4.8	Évaluation du temps, acceptant une marge d'erreur	86
5.1	Génération	90

5.2	Caractéristiques des matières	91
5.3	Noms courants des matières recyclables ou compostables	92
5.4	Définition et traitement des collectes sélectives	93
5.5	Taux de saisie	94
5.6	Combinaisons de collectes sélectives	95
5.7	Informations sur les sites	98
5.8	Les technologies	101
5.9	Coûts d'investissement	102
5.10	Durée de vie, superficie requise et limites de capacité	104
5.11	Maintenance, opération et facteur d'utilisation	105
5.12	Prix des matières et de l'énergie	107
5.13	Indices des technologies de compostage	108
5.14	Indices des centres de tri	109
5.15	Indices des incinérateurs	109
5.16	Indices des technologies d'enfouissement	109
5.17	Paramètres de scénario	112
5.18	<i>Base*</i> : coûts et taxes	114

5.19 <i>Inc.</i> : coûts et taxes	120
5.20 <i>Inc.</i> : Activité du tri-compostage et arrêt de l'enfouissement	121
5.21 Comparaison de paramètres environnementaux	132

LISTE DES FIGURES

1.1	Flot de matières	3
1.2	Flot de matières résiduelles	4
3.1	Système de référence	28
3.2	Les matières collectées	31
3.3	Relations intrants-extrants	35
3.4	Les technologies de classe <i>Det</i>	37
3.5	Le transfert	38
3.6	Approximation linéaire d'une fonction d'investissement	41
3.7	Regroupement de matières	49
5.1	$Base_*$: le coût total en fonction de la réduction de l'enfouissement	113
5.2	$Base_*$: traitement annuel moyen	118
5.3	Inc_* : le coût total en fonction de la réduction de l'enfouissement	120
5.4	Inc_* : traitement annuel moyen	122
5.5	$IncTc_*$: le coût total en fonction de la réduction de l'enfouissement	123
5.6	$IncTc_*$: traitement annuel moyen	125

5.7	Env_* : le coût total en fonction de la réduction de l'enfouissement . .	126
5.8	Env_* : traitement annuel moyen	128
5.9	Synthèse : Fonctions reliant coûts et enfouissement	130

CHAPITRE 1

Introduction

Depuis l'avènement de la société moderne, et même avant, les activités de propreté et d'hygiène des lieux publics et privés constituent des préoccupations majeures. Plusieurs facteurs font en sorte que ces préoccupations deviennent davantage problématiques. On peut penser à l'augmentation toujours grandissante de la population dans les centres urbains. On constate également une augmentation phénoménale de la consommation de biens qui a pour conséquence l'augmentation des déchets produits. De plus, les gens prennent de plus en plus conscience des problèmes environnementaux liés à la gestion classique des déchets basée essentiellement sur l'enfouissement sanitaire. Les populations ne veulent plus de déchets dans leur cour et s'opposent aux localisations proposées de sites d'enfouissement qu'ils qualifient de *localement indésirables*. On peut parler des syndromes fréquemment rencontrés comme *NIMBY* (not in my back yard) et *LULU* (locally undesirable land use). Ainsi, la société se trouve confrontée à des enjeux techniques, sociaux et environnementaux de taille. Tout d'abord les sites d'enfouissement se remplissent rapidement et, idéalement, les sites ne respectant pas les normes environnementales devraient fermer. L'impossibilité de fermer ces sites, par manque d'alternatives à court terme, constituerait une menace aussi bien à la santé publique qu'à l'équilibre écologique. Un autre enjeu environnemental important est lié au gaspillage des matières premières car l'absence de conservation des ressources augmente les coûts environnementaux par la pollution de l'air, de l'eau et du sol qui résulte des procédés d'extraction et de fabrication. Pour contrer les problèmes liés à la gestion de déchets, les gestionnaires se tournent, depuis un certain temps, vers une gestion incluant des programmes de récupération, de recyclage et de valorisation des déchets. On vise une gestion à la fois économique, écologique et adaptée à la conservation des matières premières. On parle ainsi de *gestion intégrée des déchets*.

L'objectif visé par une gestion intégrée des déchets est au moins triple :

- la diminution du gaspillage des ressources ;
- la réduction de la quantité, de la masse et du volume des déchets enfouis ;
- la minimisation des coûts et des impacts environnementaux.

Il s'agit d'un objectif multi-critère avec des composantes souvent contradictoires. L'enfouissement sanitaire, même s'il est contesté par les écologistes, demeure la méthode financièrement la moins coûteuse. La récupération et le recyclage amènent une hausse des coûts mais, en contrepartie, permettent de préserver l'environnement. Par ailleurs, la rentabilité des mesures de récupération et recyclage est en partie liée à l'évolution des marchés des matières recyclables. Ainsi, la fluctuation des prix crée une situation volatile pouvant évoluer avec l'ouverture de nouveaux marchés et l'introduction de nouvelles technologies de traitement et de recyclage. D'autres méthodes peuvent être utilisées pour réduire l'enfouissement. Nous pouvons citer le compostage qui peut être vu comme le recyclage des matières organiques et l'incinération qui, en plus de transformer les déchets en cendres et de réduire de 90% le volume des déchets enfouis, peut aussi permettre la valorisation des déchets par la production d'énergie et comporte moins de risques environnementaux à long terme comparativement à l'enfouissement sanitaire. Cependant, les technologies de pointe requises pour une gestion de déchets respectueuse de l'environnement et des préoccupations sociales nécessitent des investissements considérables dans un contexte économique précaire. Il est donc nécessaire d'utiliser une approche systémique pour avoir une vue globale afin d'analyser économiquement, techniquement, socialement et environnementalement les différentes options. Par exemple, au Québec, les *Municipalités régionales de Comté (MRC)* sont maintenant tenues de produire un plan à long terme de gestion intégrée des déchets.

Des modèles mathématiques peuvent aider les décideurs à tenir compte des avantages et des inconvénients des différentes alternatives concernant l'utilisation des technologies existantes et l'introduction de nouvelles technologies, afin d'établir une stratégie non-biaisée. Notre étude se limite à la gestion des déchets à l'état physique solide qu'on appelle abusivement "déchets solides". Notre objectif est la construction d'un modèle mathématique d'analyse d'activités permettant d'établir une stratégie optimale de gestion intégrée de déchets solides à court ou à long terme. L'analyse comprend l'évaluation des coûts d'investissement, d'opération, de maintenance, de

collecte et de transport ainsi que des impacts sociaux et environnementaux. Avant de décrire le problème considéré, énonçons d'abord quelques définitions des termes couramment utilisés dans le domaine de gestion intégrée de déchets.

Définitions

Les *déchets solides* sont des matières solides à l'état original qui émanent des activités humaines et animales et qui sont jugées indésirables ou inutilisables. La figure 1.1 décrit le flot de la matière à partir de la production jusqu'à la consommation et montre que les déchets ou matières résiduelles sont produits à tous les échelons. Les traits continus représentent le flot de la matière "utile" et les traits discontinus représentent le flot de la matière résiduelle.

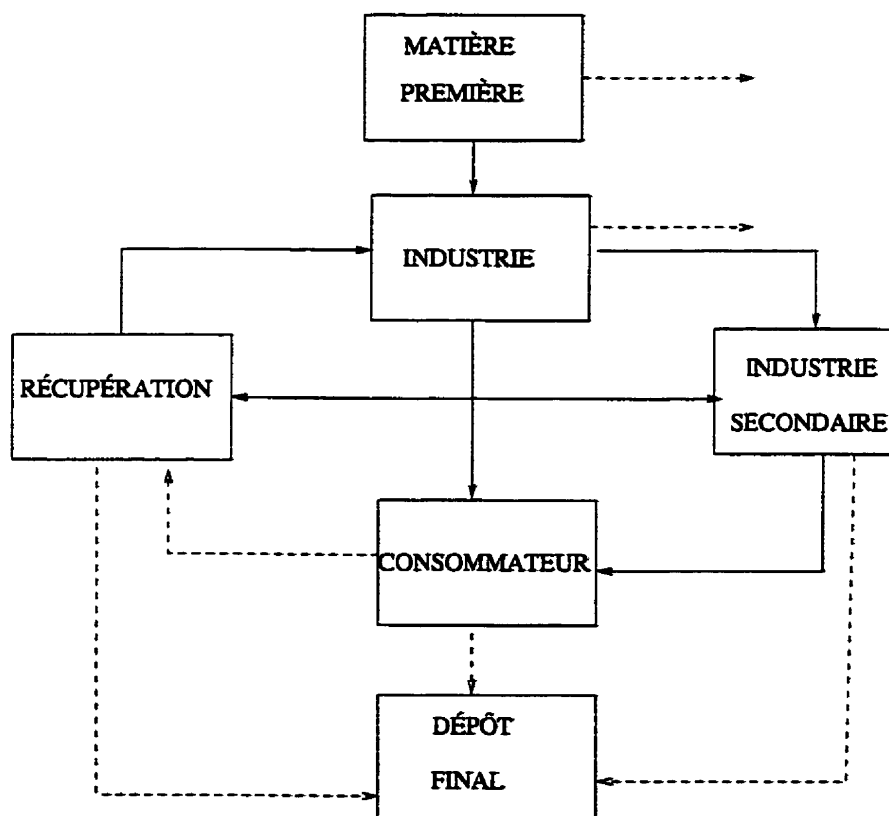


Figure 1.1 – Flot de matières

Selon l'observation de Tchobanoglous et al. [47], la *gestion de déchets* peut être définie comme une discipline de contrôle sur la génération, le stockage, la collecte, le transfert et le transport, le traitement et le dépôt des déchets solides de manière à respecter les normes sanitaires, environnementales, économiques, esthétiques, civiles et de conservation. Les principales activités sont la génération, le traitement à la source, la collecte, le traitement aux unités de traitement, le transfert, le transport et l'élimination. La figure 1.2 décrit le flot des matières résiduelles dans un système de gestion des déchets. Les flèches représentent le flot des matières résiduelles.

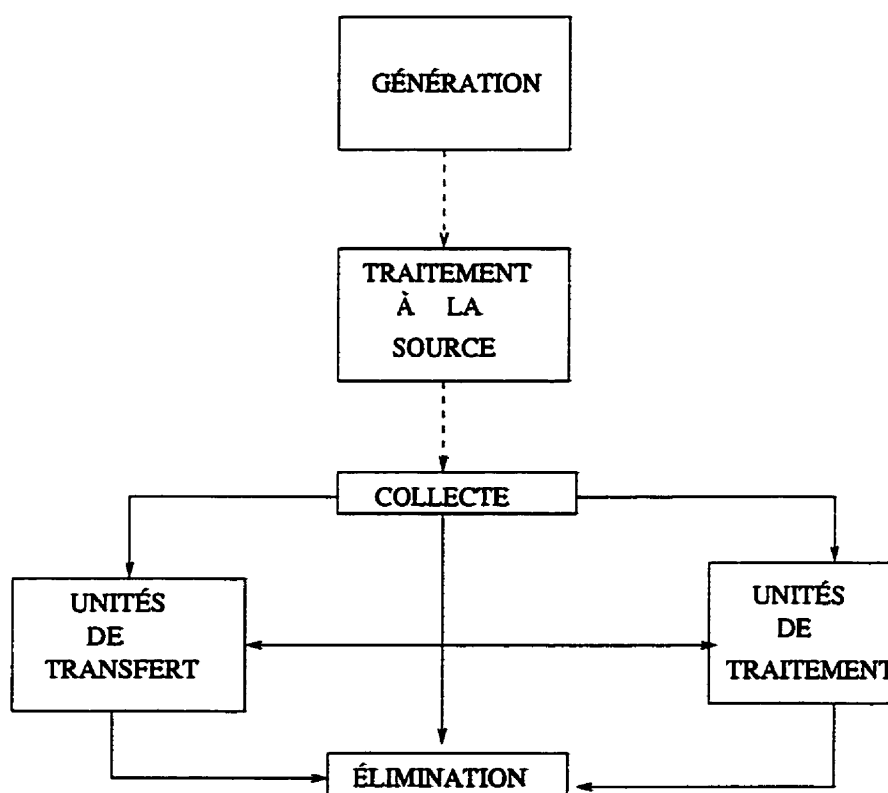


Figure 1.2 – Flot de matières résiduelles

La *génération* des déchets correspond à l'identification de certaines matières comme étant indésirables ou inutilisables. Elle peut être contrôlée par la réduction à la source et le réemploi avant la collecte. Ces deux méthodes permettent de diminuer la quantité ou la toxicité des déchets à traiter et à éliminer. Elles sont néanmoins difficiles à comptabiliser car elles sont le résultat de la volonté des différents participants. Cependant, elles peuvent être encouragées par un transfert aux citoyens d'une partie

des coûts de la gestion des déchets.

Les méthodes de *traitement à la source* sont : la séparation, l'emballage et l'acheminement des déchets aux points de collecte. La *séparation* est l'activité la plus importante du *traitement à la source*. Elle consiste à classer les déchets suivant les méthodes de traitement auxquelles ils sont destinés. Elle est l'étape préliminaire de la récupération. Les méthodes de séparation dépendent des produits à récupérer. Cependant, pour un même but de récupération, le matériel utilisé pour la séparation peut être différent. Par exemple, les produits recyclables résidentiels peuvent être récupérés par des bacs distribués aux logements, par des dépôts fixes ou en utilisant des consignes.

La *collecte* consiste au ramassage et à l'acheminement des déchets des sources aux unités de traitement, de transfert ou d'élimination. Plusieurs types de véhicules de collecte peuvent être utilisés. Par ailleurs, plusieurs critères interviennent dans le choix de ces véhicules, notamment les types de déchets collectés, le degré de réduction de volume voulu et les méthodes de traitement ou d'élimination concernées. Parfois des véhicules spécialisés sont utilisés pour la collecte et des lois interdisant la circulation de très grands véhicules à l'intérieur des villes peuvent rendre obligatoire l'emploi de petits véhicules lors de la collecte des déchets ou lors du transport des matières entre les unités.

Les unités de *transfert* permettent de réduire les coûts associés à la collecte et au *transport* des déchets. A ce niveau, des véhicules de petite taille ou spécialisés pour la collecte sont remplacés par des véhicules de grande taille ou moins spécialisés. Le transfert est une étape qui peut venir avant ou après le traitement ou peut être combiné avec le traitement.

Parmi les procédés de *traitement*, nous citons : le *réemploi*, le *recyclage*, le *tri*, les technologies de *transformation chimique* et les technologies de *transformation biologique*. Le *réemploi* est la réutilisation d'un bien, d'un produit ou d'une matière récupérée par un emploi identique ou similaire au premier emploi.

Le *recyclage* est un procédé industriel qui permet de transformer les matières

recupérées en produits de consommation. C'est le procédé généralement le mieux perçu. Il aide à préserver les matières premières et permet de réduire l'enfouissement. De plus, le recyclage des matières inertes et non combustibles, tels le verre et le métal, améliore la rentabilité du compostage et de l'incinération.

Le *tri* est un ensemble de traitements qui précèdent le réemploi et le recyclage. Les technologies de tri sont utilisées pour traiter les déchets séparés ou non séparés à la source. Elles font partie de la classe des technologies de transformation physique [47]. Les principales activités aux unités de tri sont la séparation, le nettoyage, la réduction de taille et la réduction de volume. Des objets qui ont un marché potentiel, comme les canettes d'aluminium, les contenants de plastique, les bouteilles en verre et le papier journal, sont triés et apprêtés pour le réemploi ou pour le recyclage.

La *transformation chimique* est un processus susceptible de modifier l'état des matières (i.e. passer de l'état solide à l'état liquide ou gazeux). Il permet de réduire considérablement (jusqu'à 90%) le volume des déchets. Il comprend essentiellement les procédés de traitement thermique qui sont : la pyrolyse, la gazéification et la combustion appelée aussi *incinération*. Ce dernier peut permettre une récupération de l'énergie utile.

La *transformation biologique* est un processus permettant de réduire jusqu'à 50% le volume des déchets. On distingue deux classes de technologies de transformation biologique : la décomposition aérobie ou *compostage* et la décomposition anaérobie. Le compost obtenu à partir du compostage peut être utilisé pour enrichir le sol. La décomposition anaérobie est utilisée pour produire de l'énergie et les déchets traités par cette méthode sont stabilisés, présentant ainsi moins de dangers pour l'enfouissement.

La méthode d'*élimination* des déchets la plus répandue est l'*enfouissement*. Il s'agit d'une méthode à la fois nécessaire et suffisante dans la gestion des déchets : quand bien même les déchets ne seraient pas enfouis directement, il en résulterait des résidus qui devraient être enfouis. Les déchets conduits aux sites d'enfouissement peuvent subir des pré-traitements, afin de réduire la quantité de déchets à enfouir. Ils peuvent aussi être broyés ou mis en ballots pour augmenter leur densité, afin

d'augmenter la durée de vie des sites. Les déchets dangereux ne doivent pas être enfouis directement : ils doivent subir des traitements spéciaux.

Le problème

Dans ce travail, nous désirons développer un modèle d'aide à la décision pour une gestion efficace des déchets, en mettant l'emphasis sur une description détaillée des technologies existantes et potentielles. Un tel modèle devrait permettre de répondre à des questions telles que :

1. Quand et combien devrait-on investir dans les différents types d'installations de traitement et de recyclage ?
2. Quels modes de collecte et de tri devrait-on utiliser et dans quelle proportion ?
3. Quel devrait être le flux des matières entre les différentes technologies ?

Étant donné un ensemble de choix de technologies de collecte, de traitement et d'élimination de déchets, les prix et les marchés des matières récupérées, du compost et de l'énergie, le modèle devrait permettre de faire un choix judicieux qui minimise les dépenses financières, tout en limitant l'impact environnemental et la quantité de déchets enfouis.

Les modèles d'analyse des activités possèdent un excellent potentiel pour l'analyse technico-économique des choix de technologies. Ils permettent la représentation d'une structure de gestion intégrée des déchets qui met l'accent sur les relations intrants-extrants dans un ensemble détaillé de technologies. Les relations intrants-extrants caractérisent un "*système de référence de gestion intégrée des déchets*".

Il existe déjà plusieurs modèles d'analyse d'activités liés à la gestion intégrée de déchets solides. Les modèles existants peuvent être classés en deux grandes catégories : les modèles tactiques et les modèles stratégiques. Les modèles stratégiques mettent l'accent sur l'aspect physique du système de gestion de déchets. L'emphasis est mis sur la localisation de nouveaux sites d'enfouissement, de transfert et de traitement et en l'exploitation des installations existantes. Cependant, ces modèles ne

tiennent pas compte des investissements dans les nouveaux modes de récupération. Certains se limitent à la planification de l'exploitation optimale du système existant. D'autres ajoutent la possibilité d'agrandissement de capacités et d'introduction de nouvelles technologies de traitement. Les modèles tactiques, quant à eux, mettent l'accent sur l'introduction de nouveaux modes de récupération aux sources mais ne mettent pas l'emphasis sur les investissements nécessaires pour l'augmentation de capacité des technologies de traitement. Dans ces modèles, la question principale qui se pose consiste à déterminer la proportion de chaque communauté desservie par chaque programme de récupération.

Parmi les contributions importantes de cette thèse nous notons :

- La construction d'un modèle à la fois tactique et stratégique. Ce modèle dynamique de programmation linéaire mixte incorpore à la fois les investissements relatifs aux constructions nécessaires pour le traitement et l'élimination des déchets et les investissements relatifs aux changements dans les modes de collecte ;
- La vocation multiple des sites potentiels : à chaque site correspond une liste de technologies qui peuvent y être installées. Le modèle choisit les sites à développer et la technologie qui doit être construite à chaque site ;
- La définition de deux fonctions concaves d'investissement dont la première correspond à la construction initiale des technologies et la seconde correspond à l'augmentation de capacité aux installations existantes. Chacune des deux fonctions est approchée par une fonction linéaire par morceaux ;
- Une définition de flots de matières concordant avec la réalité actuelle de la gestion des déchets. Par exemple, plusieurs flots sont définis entre les sources et les sites. Ils sont associés aux modes de collecte et aux modes de transport utilisés ;
- La prise en considération des modes opératoires de technologies. Chaque technologie peut être définie par plusieurs modes opératoires. Ainsi, la quantité de matières utiles, de compost, d'énergie ou de résidus produits dépend à la fois des matières traitées et des modes opératoires choisis.

L'objectif principal du modèle est la minimisation des coûts. Mais, grâce aux contraintes environnementales, il est possible de fixer des objectifs de récupération et d'imposer des limites sur les impacts environnementaux des nouvelles installations

et sur la quantité totale enfouie. Notre modèle est baptisé *Eugène*, en l'honneur d'Eugène René Poubelle, préfet de la Seine qui, avec l'arrêté du 7 mars 1884, obligea les propriétaires à mettre à la disposition de leurs locataires un ou plusieurs récipients communs destinés à recevoir les ordures. C'est ainsi qu'il inventa la poubelle, qui lui vola son nom.

Eugène est réalisé avec le langage *AMPL PLUS*. Une approche de *séparation et évaluation progressive* a été spécialisée aux caractéristiques de notre modèle et des coupes de réalisabilité ont été développées pour permettre un temps de résolution acceptable. Enfin, une première étude systémique de la gestion intégrée de déchets a été effectuée pour la ville de Montréal.

La suite de notre travail est organisée comme suit : le chapitre suivant est consacré au survol des modèles d'analyse d'activités liés à la gestion des déchets. Nous établissons un parallèle entre ces modèles et le modèle *Eugène*. Le modèle *Eugène* est décrit en détails au chapitre 3. Nous donnons, dans un premier temps, une description informelle du modèle qui est suivie, dans un deuxième temps, par la formulation mathématique.

Au chapitre 4, nous présentons la méthode de résolution du modèle et discutons de différents facteurs qui nous conduisent à l'amélioration du temps de résolution. Le cinquième et dernier chapitre présente les résultats d'application du modèle au problème de gestion intégrée de déchets dans la ville de Montréal. Nous analysons différentes stratégies permettant de réduire la quantité totale enfouie sur un horizon de 20 ans pour l'île de Montréal.

CHAPITRE 2

Revue de la littérature

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux modèles de gestion intégrée des déchets basés sur l'analyse des activités. Nous distinguons deux niveaux dans le processus décisionnel : la planification tactique et la planification stratégique. La planification tactique met l'accent sur l'organisation des collectes sélectives et la mise sur pied de programmes de recyclages. A ce niveau, on se préoccupe de l'allocation des matières aux différents modes de collecte et de traitement sans mettre l'emphasis sur la structure physique des systèmes de gestion de déchets. La planification stratégique consiste en la localisation de nouveaux sites d'enfouissement, de transfert et de traitement et en l'exploitation des installations existantes. Cela suppose la planification des opérations avec la possibilité de construire de nouvelles installations et de modifier les capacités. Les problèmes de planifications tactiques et stratégiques sont interdépendants et la gestion intégrée des déchets devrait idéalement permettre l'intégration simultanée des deux problèmes dans un même modèle. Mais, jusqu'à présent, ces deux problèmes ont été considérés séparément.

2.1 La planification stratégique

Dans cette section, nous donnons un aperçu des modèles de planification stratégique. Nous les avons regroupés suivant les types de technologies considérées. Nous commençons d'abord par les modèles considérant seulement les sites d'enfouissement, nous parlons ensuite des modèles incluant les unités de transfert et nous terminons avec ceux qui impliquent plusieurs méthodes de traitement. Nous soulignons également certains caractères spécifiques des modèles tels l'aspect multi-critère et la

désagrégation des flots entre les sources et les sites.

2.1.1 Choix des sites d'enfouissement

La méthode d'enfouissement sanitaire est une solution finale à l'élimination des déchets. Elle n'est cependant pas la plus désirable car personne n'aimerait habiter aux environs d'un site d'enfouissement. Erkut et al. [16] classent les sites d'enfouissement parmi les installations indésirables ; ainsi leur modèle de localisation de sites d'enfouissement a pour objectif la maximisation de la distance de ces derniers (sites d'enfouissement) par rapport à l'ensemble de la population. Shekdar et al. [42] ont conçu un modèle d'exploitation des sites d'enfouissement existants. Ce modèle permet la planification à long terme de l'acheminement des déchets vers les sites d'enfouissement et consiste à minimiser les coûts de transport.

Le modèle construit par Shekdar et al. [42] est un modèle de flot à coût minimum dans un réseau de transport. Les origines correspondent aux zones de production de déchets que nous appelons "sources" et les destinations sont les sites d'enfouissement. L'objectif est la minimisation des coûts de transport de déchets des sources aux sites d'enfouissement. Les contraintes considérées sont : l'élimination de tous les déchets de chaque source, et à chaque période de l'horizon de planification et le non-dépassement des capacités des sites d'enfouissement. Dans ce modèle, les sites de transfert ne sont pas considérés.

2.1.2 Choix des sites de transfert et des sites d'enfouissement

Lorsque les sites d'enfouissement sont éloignés des sources productrices des déchets, l'utilisation des véhicules de collecte pour transporter les déchets jusqu'aux sites d'enfouissement s'avère parfois coûteuse et non nécessaire. Pour réduire le coût de transport des déchets, certaines villes utilisent des sites de transfert à partir desquels les déchets sont transportés par des camions de transport. Marks et al. [36], Yurteri et al. [54] et Kirca et al. [30] proposent des modèles de localisation de nouveaux sites de

transfert. Harvey et al. [26] proposent un modèle de localisation des sites de transfert et des sites d'enfouissement. Shekdar [43] a construit un modèle d'objectif multicritère qui permet une planification à long terme de l'exploitation d'un système de gestion de déchets. Son objectif consiste à minimiser la somme des pénalités associées à la violation des contraintes budgétaires, ainsi qu'à la sous-utilisation des stations de transfert et des véhicules de transport.

Marks [36] a proposé un modèle statique de localisation-allocation permettant de choisir la localisation de sites de transfert pour réduire le coût de transport aux sites d'enfouissement existants. Il considère un réseau dans lequel les noeuds sources correspondent aux endroits où les déchets doivent être ramassés. Les noeuds puits correspondent aux sites d'enfouissement existants. Les sites de transfert potentiels forment une troisième classe de noeuds : les noeuds intermédiaires. Des arcs orientés relient les sources et les sites (enfouissement ou transfert) ainsi que les sites de transfert et les sites d'enfouissement. A chaque arc correspond une somme du coût de transport d'une unité de flot entre l'origine et la destination et du coût de traitement à la destination. Des variables binaires associées aux sites de transfert potentiels indiquent si le site est choisi ou pas. Dans l'objectif, ces variables sont associées à un coût fixe de construction. L'objectif du modèle est la minimisation de la somme des coûts fixes d'investissement et des coûts variables associés aux flots. Tous les déchets produits aux sources doivent être enlevés et tous les déchets transportés aux sites de transfert doivent être acheminés aux sites d'enfouissement. Yurteri [54] ainsi que Kirca et al. [30] ont proposé des algorithmes de résolution de ce problème. La méthodologie utilisée par Yurteri [54] comprend deux étapes dont la première est la localisation des sites de transfert et l'allocation des sources à ces sites. La deuxième étape consiste en l'évaluation et l'ajout du coût de transport aux sites d'enfouissement. Kirca et al. [30] évaluent en même temps l'allocation des sources aux sites et l'allocation des sites de transfert aux sites d'enfouissement. Dans les deux derniers cas, la résolution est basée sur des méthodes d'énumération comparant les possibilités de capacités des sites de transfert.

Le modèle de Harvey [26] généralise celui de Marks [36] par l'introduction d'un coût fixe de construction de sites d'enfouissement. Dans l'objectif, le coût de transport et le coût de traitement sont séparés. Deux catégories de véhicules sont considérées :

les véhicules de collectes qui quittent les sources et les véhicules de grande taille qui quittent les sites de transfert. Des coûts unitaires de transport correspondant aux deux catégories de véhicule sont calculés. Le modèle permet de choisir les sites d'enfouissement, les sites de transfert et le flot circulant sur chaque arc.

2.1.3 Choix des unités de traitement

Les modèles décrits précédemment tiennent compte uniquement des technologies d'enfouissement et de transfert. Nous voyons ici des modèles incluant d'autres technologies utilisées dans la gestion intégrée de déchets pour transformer les déchets et réduire la quantité, la masse ou le volume de déchets à éliminer. Dans ces modèles, les sites intermédiaires peuvent être soit des sites de transfert ou des unités de traitement. Gottinger [22], [23], [24] et Kahn [29] ont construit des modèles de localisation de nouveaux sites intermédiaires et de nouveaux sites d'enfouissement, avec minimisation des coûts. En plus des coûts, le modèle de Bottcher [7] tient compte de la vente des produits des unités de compostage et introduit des contraintes limitant la pollution de l'air due aux incinérateurs. Dans leur modèle, Chang et al. [9] ajoutent entre autres la vente des matières à partir des sources. L'objectif comprend les coûts et les impacts dus à la pollution. Ce modèle a été modifié par Chang et Wang [10] en introduisant des contraintes limitant le trafic.

Bottcher et al. [7] ont conçu un modèle statique pour la localisation des sites d'enfouissement et des sites intermédiaires et l'allocation des sources aux sites. Le modèle correspond à un problème de programmation linéaire mixte avec des variables binaires associées aux coûts fixes de construction. Les unités de traitement sont des localisations potentielles des incinérateurs et des unités de compostage. À chaque site correspond une limite minimale et une limite maximale sur la quantité de déchets qui doit y être traitée dans le cas où le site serait choisi. Le flot total entrant à un site de transfert doit être égal au flot quittant ce site. Aux incinérateurs, les matières sont brûlées et les résidus doivent aller aux sites d'enfouissement. Aux unités de compostage, on a une réduction de quantité due à la vente des matières recyclables et à la production de compost. Le modèle comprend également des contraintes limitant

les émissions des incinérateurs.

Fuertes et al. [20] ont présenté un modèle dynamique non linéaire d'expansion de capacités aux sites et d'allocation des sources aux sites. Des variables continues représentent la capacité existante en chaque période et à chaque noeud (intermédiaire ou puits), la vocation de ces noeuds étant définie préalablement. Au début de chaque période, la capacité disponible à chaque noeud peut être agrandie. Pour chaque site, les auteurs considèrent une fonction non linéaire concave désignant le coût d'ajout de la capacité. La capacité existante à chaque site et à chaque période est la somme de la capacité initiale et des investissements des périodes précédentes. Le flot total qui quitte chaque noeud intermédiaire doit être proportionnel au flot total entrant. Le rapport entre les deux flots est le facteur de réduction des matières en résidus et dépend de la vocation du noeud. Gottinger [22, 23] a contourné le problème de non-linéarité en remplaçant les intervalles continus de variables de capacités par des ensembles discrets de possibilités de capacités. Chaque site potentiel est remplacé par un certain nombre de sites hypothétiques représentant les possibilités de capacité d'une installation éventuellement construite à ce site. Deux sites hypothétiques ne peuvent être choisis en même temps. La résolution du problème statique est basée sur une méthode d'énumération implicite. Kahn [29] propose une méthode d'énumération implicite pour résoudre un cas particulier du problème de Gottinger [23] où chaque site potentiel correspond à une seule possibilité de capacité. De plus, Gottinger [24] présente un algorithme pour la résolution du problème dynamique d'extension de capacité. Cet algorithme comprend la combinaison d'une méthode heuristique et d'une méthode d'énumération.

Chang et al. [9] présentent une autre façon de linéariser les fonctions concaves d'expansion de capacité. Ils introduisent des variables binaires indiquant les décisions initiales d'investissement et des variables continues indiquant les investissements. L'objectif du modèle est la minimisation du coût total actualisé du système. Il correspond à la somme des coûts de transport, des coûts d'opération, des coûts de construction initiale, des coûts d'ajout de capacité et des coûts associés à la pollution de l'air moins les revenus des ventes aux sources et aux sites. Le flot total venant de chaque source à chaque période est la différence entre la génération et la vente de

matières. La quantité de chaque matière recyclable vendue à partir d'une source donnée à une période donnée est une proportion fixe de la quantité totale générée. Elle dépend de la composition des déchets à la source, du taux de saisi de la matière et du taux de participation aux programmes de recyclage. La quantité de chaque matière recyclable vendue à partir d'un site donné à une période donnée est une proportion fixe de l'activité de ce site. Elle dépend de la vocation du site et s'annule si aucune récupération n'est possible. Pour chaque période, des contraintes financières limitent le rapport entre la différence coûts-revenus et la génération. Donner une valeur positive à cette limite revient à favoriser les investissements dans des installations où la vente est possible. Le modèle a été modifié par Chang et al. [12], et par Chang et Wang [10]. Dans le modèle de Chang et al. [12] les impacts liés à la pollution ne sont pas pris en compte dans la fonction objectif. Le modèle de Chang et Wang [10] inclut des contraintes de congestion limitant le nombre de véhicules arrivant à chaque site. L'objectif de ces trois modèles tient compte de la vente des matières recyclables à partir des sources et des sites. Cependant, la proportion de matières vendues à partir des sources et à partir des sites est donnée de façon exogène.

Modèles multi-critères

Nous présentons ici des modèles à objectifs multi-critères. Les critères considérés sont les coûts, les risques environnementaux, la quantité de déchets enfouis, le trafic et les impacts dus au bruit.

Le modèle construit par Caruso et al. [8] a un objectif multi-critère. La fonction objectif comprend trois composantes dont la première, F_1 , désigne la somme des coûts de transport, de traitement et d'élimination des déchets et de mise en place de nouvelles installations. La deuxième composante, F_2 , désigne la somme des impacts environnementaux et la troisième, F_3 , représente la quantité de déchets enfouis. La méthode de résolution proposée est basée sur une méthode heuristique liée à une approche d'énumération implicite. La méthode heuristique consiste à mettre à jour le vecteur de pondération $w = (w_1, w_2, w_3)$ jusqu'à ce que l'on obtienne une solution

stable. Pour chaque vecteur w , la méthode d'énumération implicite, basée sur la méthode de Fulkerson, permet de résoudre le problème d'affectation directe des sources aux sites d'enfouissement ou des sites intermédiaires aux sites d'enfouissement et d'affectation indirecte des sources aux sites d'enfouissement. À partir de chaque vecteur de composantes positives w , on doit résoudre un problème d'affectation qui correspond à la minimisation de la fonction suivante : $F = w_1 F_1 + w_2 F_2 + w_3 F_3$. L'objectif est de construire une solution $q = (q_1, q_2, q_3)$ Pareto-optimale stable (qui demeure optimale lorsque le vecteur de pondération est légèrement modifié).

Le modèle de Chang et Wang [11] ressemble de près au modèle de Chang et al. [9]. La différence entre les deux modèles découle de l'aspect multi-critère du premier. Chang et Wang [11] introduisent quatre fonctions objectifs : minimiser les coûts, minimiser le trafic, minimiser les impacts dus au bruit et minimiser les impacts dus à la pollution de l'air. La méthode de résolution est une méthode de compromis basée sur la distance (ou l'éloignement relatif des pires cas). On doit estimer la pire valeur Z_k^* de chaque objectif Z_k et minimiser l'expression $\sum_k \pi_k * \frac{Z_k^* - Z_k}{Z_k^*}$. Pour chaque critère k , le paramètre π_k désigne le facteur de pondération associé à ce critère.

Modèles à flots désagrégés

Dans les modèles suivants, la désagrégation des flots venant des sources est traitée pour la première fois. Ces flots correspondent aux différents types de matières composant les déchets produits.

Ossenbruggen et al. [38] décrivent le système de gestion de déchets comme un réseau avec quatre types de noeuds : les noeuds sources, deux types de noeuds intermédiaires et les noeuds puits correspondant aux marchés et aux sites d'enfouissement. Les noeuds intermédiaires représentent les unités de recyclage et les incinérateurs. Plusieurs types de flots venant des sources sont possibles et correspondent aux types de matières produites. La quantité produite de chaque matière à une source donnée est proportionnelle à la génération totale des déchets à cette source. Des contraintes de conservation de flots aux unités de recyclage imposent la vente ou l'incinération

de toutes les matières arrivant à ces sites. L'énergie produite par les incinérateurs à partir d'une matière est le produit entre le flot entrant de cette matière, son pouvoir calorifique et le rendement énergétique de l'incinérateur. On a des contraintes de capacité aux noeuds puits et aux noeuds intermédiaires. L'objectif du modèle consiste à minimiser les coûts de transport en tenant compte des revenus des marchés. Dans ce modèle, les modes de collectes ou de transport utilisés ne sont pas mentionnés. Par conséquent, le coût de transport dépend uniquement de la quantité de matières transportées et de la distance parcourue.

Pour la première fois, Everett et al. [18] ont conçu un modèle stratégique tenant compte des modes de collecte utilisés aux sources. Ils considèrent un réseau comprenant les noeuds sources, les noeuds intermédiaires et les noeuds puits. Les noeuds intermédiaires correspondent à des centres de tri ou des sites d'incinération tandis que les noeuds puits correspondent à des sites de compostage ou d'enfouissement. Plusieurs types de flots passant sur les arcs sont définis par deux types d'indices dont le premier indique le nom de la matière et le second indique le mode de collecte utilisé. À partir des sources et des centres de tri, certaines matières sont vendues et on doit tenir compte des revenus de ces ventes. Aux sites d'incinération, la réduction des matières en cendres est accompagnée par la production de l'énergie. Aux sites de compostage, les matières sont transformées en compost. L'objectif du modèle est la minimisation de la somme des coûts variables de transport et traitement et des coûts fixes de construction à laquelle on soustrait les revenus de ventes des matières recyclables, du compost et de l'énergie. Le point fort de ce modèle par rapport aux modèles précédents consiste en la considération de plusieurs modes de collectes aux sources. Cependant, la désagrégation des flots à partir des sources risque de causer un certain nombre d'ennuis concernant la destination des matières collectées ensemble. Prenons l'exemple d'une source qui ne dispose que d'une collecte sélective comprenant le papier et le carton. Supposons en plus que le papier, contrairement au carton, soit plus valorisé par l'incinération que par le tri en comparant le prix des matières recyclables, l'énergie produite par l'incinération, le prix de l'énergie et les coûts de transport et de traitement. Alors, tout le papier sera dirigé vers l'incinérateur et tout le carton sera dirigé vers le centre de tri comme si on disposait de deux collectes sélectives distinctes : la collecte sélective du papier et la collecte sélective du carton. On observe donc que les auteurs n'ont pas tenu en considération des contraintes imposant

la proportionnalité à chaque destination de matières simultanément collectées.

2.2 La planification tactique

Les modèles tactiques existants sont plutôt adaptés à la gestion intégrée de déchets de petites communautés. Pour chaque mode de traitement, les auteurs font correspondre à chaque unité de déchets produits, un coût global incluant le transport et le traitement. Ce coût serait difficile à évaluer dans un contexte régional où d'une part, les sources productrices couvrent un grand territoire et d'un autre côté, on doit tenir compte de plusieurs possibilités de localisation pour chaque technologie. Lund [35] a construit un modèle linéaire qui pourrait être utilisé pour évaluer les coûts d'introduction et d'expansion de programmes de recyclage. Baetz et al. [2] ont construit un modèle dynamique de programmation linéaire mixte qui tient compte du caractère évolutif du taux de recyclage. Everett et al. [17] ont généralisé le modèle de Lund [35] en considérant plusieurs sites d'enfouissement et définissant des contraintes d'exclusion mutuelle entre les sites d'enfouissement et entre les programmes de recyclages et compostage.

Lund [35] suppose un ensemble d'entités répartis en classes et un certain nombre de programmes de recyclage. On désigne par entité, un ensemble "unitaire" de producteurs de déchets. Par exemple dans un contexte résidentiel, une entité peut correspondre à un logement tandis que, dans le contexte industriel une entité désigne une usine. Dans ce modèle, la quantité de déchets générés par chaque entité et la proportion recyclable par unité de matières générées sont connues. Les variables de décision représentent le nombre d'entités de chaque classe desservi par chaque programme de recyclage à chaque période et la quantité enfouie à chaque période. La fonction objectif comprend deux composantes linéaires dont la première se rapporte à la quantité totale enfouie et la deuxième se rapporte à la quantité totale recyclée. Le nombre d'entités de chaque classe desservies par chaque programme est limité par le nombre total d'entités dans cette classe et la quantité cumulative enfouie ne doit pas dépasser la capacité initiale du site d'enfouissement. Étant données une capacité

d'un site d'enfouissement et une durée de vie en nombre d'années, le problème revient à optimiser le coût de recyclage et d'enfouissement durant la durée de vie du site d'enfouissement.

Le modèle construit par Baetz et al. [2] est un modèle de programmation linéaire mixte avec deux types de variables binaires. Une première variable binaire désigne la décision relative à la date de commencement d'un programme de recyclage. La deuxième variable binaire désigne la décision relative à l'ouverture d'un autre site d'enfouissement (on dispose déjà d'un site unique qui peut se remplir avant la fin de l'horizon de planification). Les variables continues représentent la quantité recyclée, la quantité incinérée et la quantité enfouie dans chacun des sites à la fin de chaque période. L'objectif consiste à minimiser la somme actualisée des coûts associés au recyclage, à l'enfouissement et à l'incinération. Pour l'enfouissement, on ne considère que le coût de transport. Pour le recyclage et l'incinération, on ajoute les coûts de traitement et on retranche les revenus associés aux produits recyclés ou à l'énergie produite.

Everett et al. [17] ont construit un modèle de programmation linéaire mixte qui généralise le modèle de Lund par la considération de plusieurs sites d'enfouissement mutuellement exclusifs. Les auteurs veulent minimiser la somme du coût d'enfouissement et des coûts d'introduction de programmes de compostage et de recyclage. Le recyclage et le compostage sont vus comme des moyens de dévier les matières de l'enfouissement. Le modèle comprend des contraintes de capacité des sites d'enfouissement et des contraintes d'exclusion mutuelle entre les sites d'enfouissement ou les programmes de déviation. Pour la définition des contraintes d'exclusion entre les sites d'enfouissement, des groupes de sites d'enfouissement mutuellement exclusifs sont définis et des variables binaires indiquant le choix des sites d'enfouissement sont introduites. Chaque groupe est associé à une contrainte imposant le choix d'au plus un site. La quantité enfouie à chaque site doit être nulle si le site n'est pas choisi. A chaque programme de déviation correspond le nombre d'entités de chaque classe desservies et le taux de matières déviées par chaque entité. Pour chaque groupe de programmes mutuellement exclusifs, la somme des nombres d'entités de chaque classe desservies par chaque programme doit être inférieure au nombre total d'entités dans

cette classe. Ceci veut dire que deux programmes exclusifs doivent desservir des entités différentes. La contrainte de bilan impose que les matières non déviées soient enfouies.

2.3 Classification des modèles

Dans ce chapitre, nous avons présenté des modèles de *gestion intégrée de déchets* issus de la revue de la littérature. Nous comparons ces modèles suivant quatre critères : l'*horizon de planification*, le *niveau de décision*, les *facteurs considérés dans l'objectif* et les *technologies de traitement*.

- i) *Horizon de planification* : nous distinguons les planifications sur une période (statique) et les planifications sur plusieurs périodes (dynamique).
- ii) *Niveau de décision* : nous distinguons la planification tactique et la planification stratégique.
- iii) Les *facteurs considérés dans l'objectif* : coûts de collecte, coûts de transport, coûts de traitement, coûts d'élimination, coûts de construction, distance entre la population et les installations, impacts environnementaux et enfouissement.
- iv) Les *technologies* utilisées pour le *traitement* et l'*élimination* : enfouissement, tri, recyclage, incinération et compostage. Pour certains auteurs, les quatre technologies de traitement que l'on vient de mentionner sont considérées indistinctement alors que, pour d'autres, chacune de ces technologies est considérée de façon distincte et indépendante.

Les tableaux 2.1 à 2.6 fournissent un aperçu synthétique des principaux modèles. Un parallèle entre ces modèles est dressé, selon les critères ci-haut mentionnés.

TAB. 2.1 – Problème de localisation des sites d'enfouissement

<i>Auteur</i>	<i>Horizon</i>	<i>Niveau</i>	<i>Objectif</i>	<i>Technologies</i>
Erkut [16]	Statique	Stratégique	distance entre population et installations.	enfouissement
Shekdar [42]	Dynamique	Stratégique	transport et élimination.	enfouissement

TAB. 2.2 – Problème de localisation des sites de transfert

<i>Auteur</i>	<i>Horizon</i>	<i>Niveau</i>	<i>Objectif</i>	<i>Technologies</i>
Marks [36] Harvey [26] Yurteri [54] Kirca [30]	Statique	Stratégique	transport, traitement, élimination, constructions.	transfert enfouissement
Shekdar [43]	Dynamique	Stratégique	bonne utilisation des prévisions : finances, capacités des installations et des véhicules.	transfert enfouissement

TAB. 2.3 – Problème de localisation des sites de transfert et des sites de traitement

<i>Auteur</i>	<i>Horizon</i>	<i>Niveau</i>	<i>Objectif</i>	<i>Technologies</i>
Bottcher [7] Gottinger [23] Kahn [29]	Statique	Stratégique	transport, traitement, constructions.	traitement enfouissement
Fuertes [20] Gottinger [24]	Dynamique	Stratégique	transport, traitement, extensions.	traitement enfouissement
Chang [9]	Dynamique	Stratégique	transport, traitement, extensions, pollution, ventes.	traitement enfouissement

TAB. 2.4 – Modèles stratégiques avec objectifs multi-critères

<i>Auteur</i>	<i>Horizon</i>	<i>Niveau</i>	<i>Objectif</i>	<i>Technologies</i>
Caruso [8]	Statique	Stratégique	coûts, impact à l'environnement, quantité enfouie.	tri compostage incinération enfouissement
Chang [11]	Dynamique	Stratégique	coûts, pollution, bruit, trafic, ventes.	traitement enfouissement

TAB. 2.5 – Modèles stratégiques utilisant des flots détaillés de matières

<i>Auteur</i>	<i>Horizon</i>	<i>Niveau</i>	<i>Objectif</i>	<i>Technologies</i>
Ossenbruggen [38]	Dynamique	Stratégique	transport, traitement, ventes.	recyclage enfouissement incinération
Everett [18]	Dynamique	Stratégique	transport, traitement, ventes, constructions.	tri compostage incinération enfouissement

TAB. 2.6 – Modèles tactiques

<i>Auteur</i>	<i>Horizon</i>	<i>Niveau</i>	<i>Objectif</i>	<i>Technologies</i>
Lund [35]	Dynamique	Tactique	recyclage, enfouissement.	recyclage enfouissement
Baetz [2]	Dynamique	Tactique	transport, ventes, ouverture d'un site d'enfouissement.	recyclage incinération enfouissement
Everett [17]	Dynamique	Tactique	recyclage, compostage, enfouissement.	recyclage compostage enfouissement

2.4 Conclusion

Les modèles décrits ci-haut sont spécialisés soit uniquement au problème tactique ou au problème stratégique. De plus, dans tous les modèles stratégiques, un site est prédestiné à une technologie. Certains auteurs [42, 43, 38] ne prévoient pas de nouvelles constructions. Pour d'autres [26, 29, 8] une seule capacité est allouée à chaque site et le modèle détermine si le site est utilisé ou pas. Pour d'autres encore [20, 24] des coûts non linéaires d'expansion sont utilisés et rendent le problème très difficile à résoudre. Parfois, [9, 10, 11, 12] une linéarisation très simplifiée des fonctions concaves d'investissement est introduite. Cette linéarisation suppose deux fonctions linéaires pour chaque site et chaque période : la première est associée à la construction initiale et comprend un coût fixe et un coût variable. La seconde est associée à l'ajout de capacité à une technologie existante et comprend uniquement un coût variable.

Aucun modèle ne prévoit des investissements reliés aux changements dans les modes de collectes. La plupart ne considèrent qu'un seul mode de collecte. Everett et al. [18] prévoient que des modes de collecte disponibles à chaque source peuvent être utilisés mais ne tiennent pas compte des coûts d'investissement reliés aux changements. Les modèles tactiques introduisent des coûts reliés à l'ajout de différents programmes de recyclage mais les coûts considérés sont globaux et incluent le transport et le traitement.

On constate également que la définition des flots ne concorde pas exactement avec la réalité actuelle de la gestion intégrée de déchets. Certains auteurs considèrent un seul type de flot venant des sources. D'autres s'intéressent aux flots venant des sources en supposant qu'ils correspondent aux différentes matières [38, 18].

Nous nous proposons de construire un modèle dynamique permettant une planification à la fois tactique et stratégique. Notre apport se situe surtout à l'intégration simultanée des coûts reliés aux constructions des nouvelles installations pour traiter ou éliminer les déchets et des coûts reliés aux changements dans les modes de collecte. Il se situe également aux niveaux de l'affectation des technologies aux sites, de

l'approximation linéaire des fonctions d'investissement, de l'agrégation de matières venant des sources et du calcul des flots venant des sites.

Un site n'est plus prédestiné à une seule technologie : pour chaque période, le modèle choisit les sites à développer ainsi que la technologie à construire à chaque site. Nous considérons deux fonctions concaves d'investissement que nous approchons par des fonctions linéaires par morceaux. La première fonction correspond à la construction initiale tandis que la seconde est associée à l'ajout de capacité. Le nombre de segments utilisés dans chaque approximation dépend de la courbure de la fonction.

En ce qui concerne les investissements dans les modes de collectes, le modèle choisit pour chaque source et pour chaque période une combinaison de collectes. Les coûts de sensibilisation et d'achat de matériaux sont tenus en considération pour chaque collecte contenue dans la combinaison choisie.

Notre modèle est flexible au niveau de la définition des flots venant des sources et nous visons la précision au niveau du calcul des flots venant des sites. Les flots venant des sources sont définis à partir des moyens de collecte utilisés, ce qui nous permet de garder la proportionnalité des matières simultanément collectées. Au niveau du traitement, nous introduisons des modes opératoires qui nous permettent de calculer aisément les résidus produits ainsi que les matières et l'énergie qui peuvent être vendues. La vente de matières n'est pas une proportion fixe de la génération aux sources ou de l'activité totale aux sites. Elle dépend à la fois des modes de collectes choisis, des modes opératoires utilisés, de la capacité des marchés et des prix proposés par les marchés. L'utilisateur du modèle a la possibilité d'introduire des prix concaves linéaires par morceaux lorsque le prix à l'unité dépend de la quantité vendue.

CHAPITRE 3

Présentation du modèle

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle mathématique d'optimisation pouvant être utilisé, au niveau municipal comme au niveau régional, pour planifier une gestion intégrée de déchets. Le problème classique de gestion de déchets se résumait en ces termes : "ramasser les déchets et ensuite les enfouir". La planification correspondante revenait à localiser les sites d'enfouissement, localiser les sites de transfert et affecter les déchets produits aux sites. L'objectif visé était la minimisation des coûts d'investissement et de transport, en ne considérant qu'une seule méthode d'élimination et qu'un seul mode de collecte. Depuis un certain temps, les gens se rendent compte des problèmes environnementaux liés à l'enfouissement et réalisent de plus en plus la valeur économique de ce qu'ils appelaient "déchets". Par conséquent, des mesures concrètes doivent être mises en oeuvre pour valoriser les déchets, réduire l'enfouissement et minimiser les impacts environnementaux. Ainsi, de nouvelles méthodes de traitement et de nouveaux modes de collecte doivent être introduits. A l'aide du modèle que nous avons construit, le décideur a la possibilité de confronter différentes méthodes de traitement et différents modes de collecte utilisés dans la gestion de déchets pour faire un choix éclairé qui minimise les coûts, tout en réduisant l'enfouissement et en tenant compte des impacts environnementaux associés aux technologies.

Notre modèle permet de planifier, sur un horizon de plusieurs périodes de même nombre d'années, la construction et l'agrandissement des installations pour traiter ou éliminer les déchets ainsi que les changements relatifs aux modes de récupération aux sources. Nous voulons tracer l'itinéraire suivi par les déchets et leurs matières dérivées à partir de la génération jusqu'à la vente des produits au marché et à l'élimination finale des résidus. Le problème se pose en ces termes :

L'utilisateur doit fournir : (1) la localisation des sources, (2) la génération et la composition des déchets à chaque source, (3) la liste des modes de collecte et des combinaisons possibles de modes de collecte à chaque source, (4) l'ensemble des sites contenant ou pouvant contenir des technologies de traitement ou d'élimination, (5) l'ensemble des technologies construites ou pouvant être construites, (6) la liste des modes opératoires de chaque technologie, (7) la localisation des marchés de collectes, de matières recyclables, du compost et de l'énergie, (8) le nombre de périodes de temps et la durée de chaque période.

Le modèle détermine pour chaque période, (1) la combinaison de collectes choisie à chaque source, (2) la capacité de chaque technologie à construire sur chaque site, (3) le niveau d'activité de chaque mode opératoire de chaque technologie ainsi que (4) le flot de matières et de l'énergie traversant chaque arc du système de référence.

3.1 Le système de référence

Notre système de référence est schématisé par un réseau (figure 3.1) avec trois types de noeuds : les sources, les destinations intermédiaires et les destinations finales. Une destination intermédiaire est une localisation d'un procédé de traitement ou de transfert. Une destination finale est soit un marché, soit une localisation d'un site d'enfouissement. Les arcs définissent des liens possibles entre les sources et les destinations ou entre les destinations intermédiaires et d'autres destinations. Nous distinguons deux types de flots : les flots agrégés et les flots désagrégés.

Les flots agrégés sont représentés par des traits continus. Il y a deux types de flots agrégés : les flots qui quittent les sources et les flots qui quittent les unités de transfert. Les flots qui quittent les sources sont associés aux différents modes de collecte. Ils peuvent être destinés aux sites ou aux marchés. Les flots qui quittent les unités de transfert sont tous destinés à l'enfouissement.

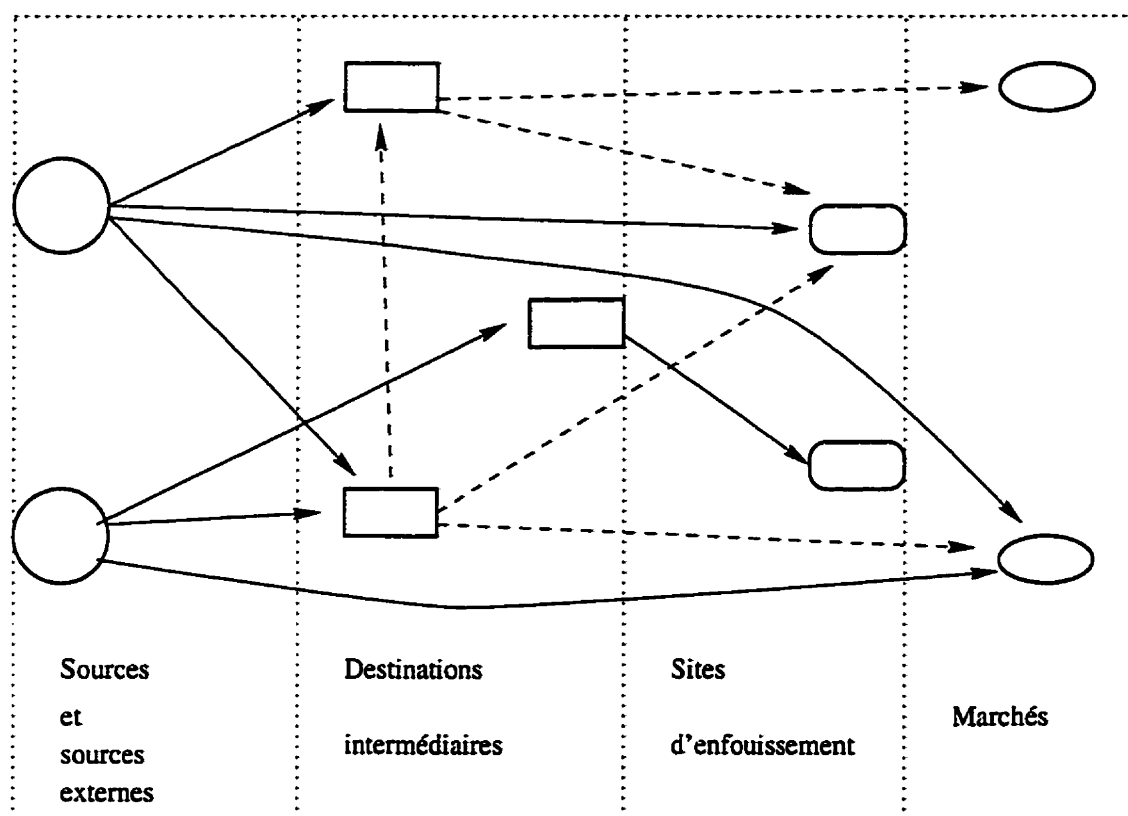


Figure 3.1 – Système de référence

Les flots désagrégés, en pointillé, quittent les unités de traitement et ont pour destination les marchés ou les autres sites. Prenons un exemple d'un site abritant un centre de tri : chaque matière recyclable conduit de ce site au marché correspond à un flot désagrégé. A partir d'un site sur lequel un incinérateur est construit, on a deux types de flots désagrégés : les cendres qui peuvent être conduites aux sites d'enfouissement et l'énergie qui peut être vendue au marché.

3.1.1 Les sources

La zone étudiée doit être subdivisée en plusieurs sources qui correspondent aux différents secteurs économiques et/ou aux subdivisions géographiques du territoire ou de la région. Pour chaque période, nous supposons connaître correctement la quantité totale de déchets générés aux sources, ainsi que la proportion de chaque matière. Nous

laissons la possibilité à l'utilisateur du modèle, de choisir le niveau du détail quant à la définition des matières produites aux sources. Quelqu'un pourrait définir une seule matière "le déchet", tandis qu'une autre personne, suivant différents critères, définirait plus d'une matière.

Les modes de collecte

En plus de la collecte régulière qui sert à ramasser tous les déchets résiduels, il existe aujourd'hui une tendance à faire des collectes sélectives. Par exemple, dans la ville de Montréal, les matières recyclables peuvent être ramassées au moyen des dépôts fixes (collecte par apport volontaire) ou au moyen de bacs distribués aux logements (collecte porte à porte de matières recyclables).

L'utilisateur de notre modèle a la possibilité de définir plusieurs modes de collectes suivant la séparation ou la combinaison des matières destinées au tri pour réemploi-recyclage ou une autre méthode de traitement. Une collecte sélective est définie par une liste de matières qui la composent. Par exemple, on peut faire la collecte sélective des feuilles mortes ou du verre ou prendre ensemble le plastique et le verre. Les modes de collectes sont également caractérisés par la fréquence, l'endroit de la collecte et le matériel utilisé lors du traitement à la source. Nous distinguons par exemple l'utilisation des bacs pour la collecte des matières recyclables, l'utilisation des dépôts fixes ou celle des consignes.

La quantité de chaque matière ramassée par une collecte sélective à une source donnée dépend du taux de participation de cette source à cette collecte, ainsi que du taux de saisie de cette matière par cette collecte. La collecte régulière existe toujours à toutes les sources. Elle sert à ramasser tous les déchets en l'absence des collectes sélectives ou les déchets résiduels des collectes sélectives.

Combinaisons de collectes sélectives

Deux collectes sélectives peuvent être choisies simultanément lorsqu'elles n'ont pas une matière en commun ou si elles ne desservent pas un même groupe de gens. Ces collectes sont dites compatibles. En guise d'exemple, la collecte des matières recyclables par apport volontaire peut être choisie en même temps que la collecte porte à porte des matières putrescibles.

Des paramètres appelés "*population desservie*" informent le modèle si une collecte sélective est disponible pour toute la population ou pour une partie de la population. Par exemple, la collecte sélective du papier par apport volontaire peut être choisie en même temps que la collecte sélective du papier porte à porte si par exemple la première dessert 30% et la deuxième dessert 50% de la population. Ceci signifie que les deux collectes concernent deux groupes distincts d'individus et que 20% de la population ne serait pas desservie par une collecte sélective du papier.

Des combinaisons possibles de collectes sélectives compatibles sont définies par l'utilisateur. Une combinaison contient zéro, une ou plusieurs collectes sélectives. Les collectes sélectives contenues dans une même combinaison peuvent avoir des destinations différentes. La combinaison vide signifie qu'aucune collecte sélective n'est choisie. Des collectes identiques mais avec des fréquences différentes définissent des combinaisons différentes. Par exemple, dans une combinaison on aurait la collecte porte à porte des matières recyclables à toutes les semaines et la collecte des matières putrescibles à toutes les deux semaines et dans une autre, les deux types de collectes seraient à toutes les deux semaines.

Le modèle permet de faire un choix d'une seule combinaison de collectes sélectives à chaque source, au début de chaque période. Il existe, dans le modèle, des variables binaires associées aux choix de combinaisons. Les indices sur ces variables sont la source, la période et la combinaison. Ainsi, une combinaison est choisie à une source et à une période données lorsque la variable binaire correspondante prend la valeur 1. À la figure 3.2, on schématise le flot des matières à partir d'une source génératrice, étant donné le choix de la combinaison "12", des collectes sélectives *col1*

et *col2*. La collecte régulière résiduelle de cette combinaison est désignée par *sv12*.

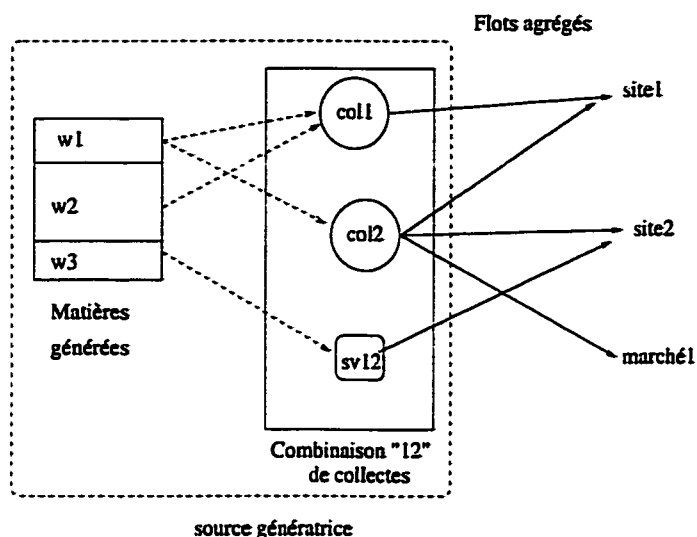


Figure 3.2 – Les matières collectées

Les sources externes

Les unités de traitement peuvent accepter des matières venant d'ailleurs. Nous appelons les origines de ces matières "sources externes". L'utilisateur n'a pas à définir des combinaisons de collectes aux sources externes mais simplement fournir la composition des collectes acceptées et la quantité disponible pour chaque collecte. Remarquons que la définition des matières et des collectes peut être différente de celle adoptée pour les sources. Par exemple, si on ne connaît pas la composition d'une collecte venant d'une source externe, on peut créer une nouvelle matière qui serait la seule composante de cette collecte et étudier les propriétés de traitement de cette matière.

3.1.2 Les sites

Une fois que les matières sont collectées, elles peuvent être conduites aux sites pour être traitées ou enfouies. Chaque site est caractérisé par sa localisation, sa

superficie et la liste des technologies pouvant y être installées. Le genre de technologie installée à un site lui confère le rôle de destination intermédiaire ou finale.

Plan des expansions des technologies

Contrairement à ce qui est considéré dans les autres modèles, un site n'est pas prédestiné à une seule technologie (incinérateur, centre de tri...). En effet dans la plupart des modèles, on doit essentiellement décider si le site est utilisé ou pas, la technologie à construire et sa capacité étant préalablement connues. Notre modèle détermine si le site a besoin d'être développé, du type de technologie qui y sera construite et du plan des expansions de capacité.

Trois types de variables binaires et trois types de variables continues sont utilisés pour schématiser le plan des expansions des technologies aux sites. Les types de variables binaires sont appelées "*existence*", "*décision de construire*" et "*décision d'agrandir*". Les variables continues correspondantes sont respectivement la "*capacité existante*", la "*capacité construite*" et la "*capacité ajoutée*".

L'utilisateur du modèle doit fournir une liste de sites, une liste de technologies, et, pour chaque technologie, la localisation et la capacité des installations existantes à la période initiale ainsi que les endroits susceptibles de recevoir de nouvelles installations et les limites sur les capacités acceptables. Le modèle doit déterminer, pour chaque technologie, la capacité construite à chaque site au début de chaque période.

Une hypothèse du modèle impose que pour chaque période, il existe au plus une technologie par site. Cette hypothèse nous permet de calculer plus aisément la quantité de chaque type de flots venant des sites. Ainsi, un site pouvant contenir plus d'une technologie, devra être partitionné en plusieurs sites.

Modes opératoires

On a deux types de flots au niveau des sites de traitement, les flots qui entrent et les flots qui sortent. Nous les appelons respectivement "*intrants*" et "*extrants*". Les intrants sont soit des flots agrégés venant des sources soit des extrants d'autres sites de traitement. Les extrants sont des matières ou de l'énergie. Les matières produites aux sites intermédiaires peuvent être vendues aux marchés, enfouies directement ou acheminées vers d'autres sites de traitement. L'énergie produite aux sites peut être vendue aux marchés.

Aux unités de compostage, différentes recettes sont utilisées et permettent de choisir les intrants en fonction des catégories de compost qu'on veut produire. Dans la suite, le mot "*mélange*" désignera une généralisation du mot "*recette*". Pour certains procédés de traitement, "*mélange*" voudra dire tout simplement une matière, un mode de collecte, un regroupement de matières ou un regroupement de modes de collectes. Le traitement de chaque mélange est appelé "*mode opératoire*". La nature et la quantité des extrants dépend de l'activité des modes opératoires.

Dans une version initiale du modèle [5], pour le calcul des matières recyclables et des matières résiduelles obtenues à partir du tri, les centres de tri étaient isolés dans une classe de technologies à part. Ceci nous obligeait à identifier pour chaque période, les sites contenant les centres de tri et donc de générer des contraintes supplémentaires impliquant à la fois des variables binaires (existence) et des variables continues (flots). De plus, les modes opératoires utilisés pour les incinérateurs et pour les unités de tri-compostage, obligeaient l'utilisateur à faire des calculs supplémentaires, avant d'entrer les données. Le but de ces calculs visait à déterminer les extrants du traitement de tous les flots agrégés venant des sources, connaissant les extrants des matières composant ces flots. Rappelons que ces flots résultent des collectes sélectives et des collectes régulières résiduelles associées à toutes les combinaisons de collectes sélectives définies aux sources. Dans la version présente du modèle, le tri ne fait plus une classe de technologie à part et l'utilisateur n'est plus obligé de déduire les extrants du traitement pour chaque type de flots agrégés. Ces calculs sont faits directement par le modèle. L'utilisateur doit simplement subdiviser l'ensemble de technologies de traitement en trois

classes disjointes : "*Recette*", "*Det*" et "*Moy*".

Dans la classe "*Recette*", les modes opératoires sont les différentes recettes fournies par l'utilisateur. Dans la classe "*Moy*", les modes opératoires fournis par l'utilisateur correspondent aux différentes matières et le modèle utilise des modes opératoires correspondant aux différents flots. Dans la classe "*Det*", les modes opératoires définis par l'utilisateur et utilisés par le modèle correspondent aux différentes matières.

La classe Recette

Cette classe comprend des technologies pour lesquelles l'utilisateur dispose des règles de calcul, applicables aux flots agrégés comme aux flots désagrégés, permettant de prédire la quantité de chaque type d'extrait. Deux données exogènes sont essentielles : la proportion de chaque type d'intrant utilisée et la quantité de chaque type d'extrait produite par unité d'activité de chaque mode opératoire.

Les technologies de compostage font partie de cette catégorie lorsque les recettes de compostage sont bien définies. Voici un exemple de recette de compostage : un mélange de 0.47 T de collecte sélective de résidus de cuisine avec 0.53 T de collecte sélective de papier donne comme résultat 0.70 T de compost-A.

Les incinérateurs font partie de la classe "*Recette*", lorsque l'utilisateur choisit de ne pas utiliser de façon détaillée la teneur en cendres et la quantité d'énergie résultant du traitement de chaque matière, mais dispose des estimations globales des extraits de chaque flot agrégé. Comme exemple d'estimation globale, on peut tout simplement dire qu'une tonne de déchets résidentiels permet de produire 0.10 T de cendres et autant de kilo joules d'énergie.

La classe Moy

Pour les technologies de la classe "Moy", on dispose des extrants du traitement des matières et on aimerait que le modèle déduise les extrants des flots agrégés. Les modes opératoires sont liés étroitement aux types d'intrants et ainsi, chaque mode opératoire n'accepte qu'un seul type d'intrant.

Les incinérateurs font partie de cette classe, lorsque l'utilisateur peut trouver facilement la teneur en cendres et la production unitaire de l'énergie pour chaque type de matières. Lorsque les sources sont plus ou moins homogènes et que la composition d'une collecte sélective ne varie pas tellement d'une source à l'autre, les technologies de tri et les technologies de tri-compostage font également partie de cette classe.

La différence essentielle entre les technologies de cette classe et les technologies de la classe *Recette* est la suivante : pour les technologies de la classe *Recette*, les proportions des extrants des modes opératoires sont des données exogènes tandis que pour les technologies de la classe *Moy*, elles se déduisent de manière endogène par le modèle. Le graphique 3.3 décrit le flot de matières à travers les modes opératoires d'une technologie. Un mode opératoire peut accepter plusieurs types d'intrant et un même type d'intrant peut être utilisé par différents modes opératoires.

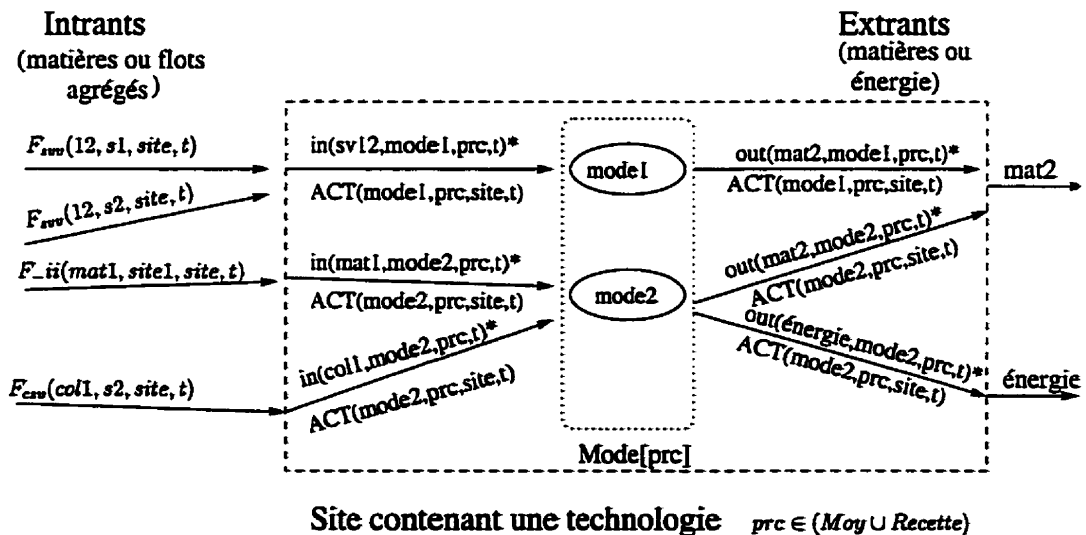


Figure 3.3 – Relations intrants-extrants

- $F_{csv}(coll, s, site, t)$: quantité de matières acheminées annuellement, au moyen de la collecte sélective $coll$, de la source s au site $site$ durant la période t et traitées par une technologie des classes *Recette* ou *Moy* ;
- $F_{svv}(12, s, site, t)$: quantité de matières acheminées annuellement, au moyen du sac vert résiduel de la combinaison 12, de la source src au site $site$ durant la période t et traitées par une technologie des classes *Recette* ou *Moy* ;
- $F_{ii}(mat1, sitel, site, t)$: quantité de matière $mat1$ transportée du site intermédiaire $sitel$ au site intermédiaire $site$ durant la période t ;
- $ACT(mod, prc, site, t)$: activité du mode opératoire mod du procédé prc au site $site$ durant la période t ;
- $in(xx, mod, prc, t)$: proportion de l'intrant xx , par unité d'activité du mode opératoire mod , des technologies prc ;
- $out[p, mod, prc, t]$: quantité d'extrait p produite par unité d'activité du mode opératoire mod des technologies prc ;
- $Mode[prc]$: liste des modes opératoires de la technologie prc .

La classe Det

Lorsque la composition des flots agrégés de même nom varie d'une source à l'autre, cette classe comprend les technologies pour lesquelles les extrants dépendent individuellement des matières traitées. En prenant l'exemple d'un centre de tri, la

quantité de papier glacé produite découle uniquement de la quantité de papier glacé triée. Par conséquent, si, pour une collecte sélective de matières recyclables, la composition varie selon les sources, alors les centres de tri ne font pas partie de la classe "Moy" mais font partie de la classe "Det".

La figure 3.4 montre que les modes opératoires sont étroitement liés aux matières composant les flots. Tout d'abord la quantité de chaque matière est calculée. Ensuite, on en déduit l'activité des modes opératoires associés et par conséquent les extrants de la technologie.

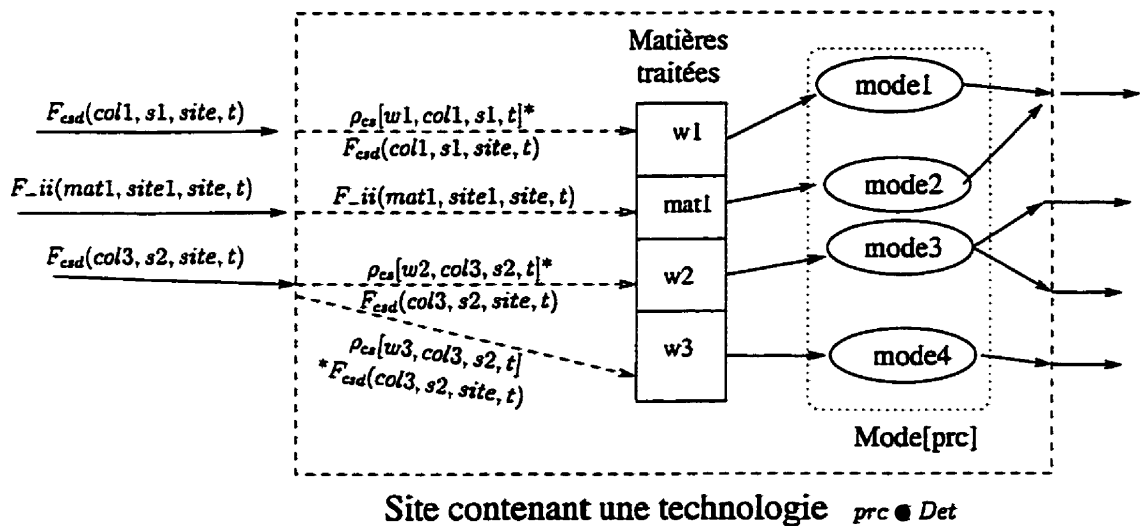


Figure 3.4 – Les technologies de classe *Det*

$\rho_{cs}[w, col, s, t]$: proportion de la matière *w* dans les matières obtenues par la collecte *col* à la source *s* durant la période *t*;

Extrants des sites de transfert

Les matières produites par les procédés de transfert sont des matières agrégées. À ce niveau, les matières venant des sources sont compactées, dans le but de réduire leur coût de transport aux sites d'enfouissement. Il est difficile de connaître exactement la composition du flot quittant un site de transfert car plusieurs types de flots arrivent et peuvent être mélangés. Dans un cas particulier où chaque site de transfert serait lié à un seul site d'enfouissement, la quantité de chaque matière transférée à un site serait égale à la quantité de la même matière conduite de ce site au site d'enfouissement associé. Le problème se pose surtout dans le cas général où un site de transfert peut desservir plus d'un site d'enfouissement car dans ce cas il est difficile de connaître la composition du flot conduit à chaque site d'enfouissement. Nous avons supposé des modes opératoires permettant de classer suivant leurs origines, les matières qui arrivent aux sites de transfert. L'usager du modèle classe les sources en un certain nombre de catégories de sources plus ou moins homogènes. À chaque catégorie correspond un flot agrégé quittant les sites de transfert. La proportion de chaque matière dans ce flot serait sa proportion moyenne dans les déchets produits aux sources composant la catégorie correspondante. La figure 3.5 illustre le transfert des matières venant de deux catégories de sources : $cat1 = \{s1, s2\}$ et $cat2 = \{s3\}$. Nous supposons que la combinaison de collecte "12" est choisie aux sources $s1$ et $s3$, tandis que la source $s2$ choisit la combinaison de collecte "0".

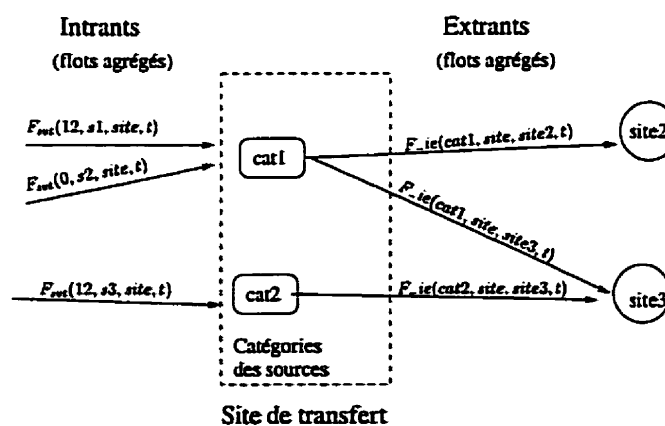


Figure 3.5 – Le transfert

- $F_{svt}(c, s, site, t)$: quantité de matières acheminées annuellement, au moyen du sac vert résiduel de la combinaison c , de la source s au site $site$ durant la période t , pour un transfert avant l'enfouissement ;
- $F_{ie}(cat, org, dest, t)$: quantité de matière agrégée cat transportée du site intermédiaire org au site d'enfouissement $dest$ durant la période t ;

Volume total enfoui

La capacité des sites d'enfouissement se mesure en unité de volume. Comme les unités de poids sont utilisées pour tous les types de flots, l'utilisateur doit fournir les masses volumiques de toutes les matières définies. Le modèle calcule la masse volumique des flots venant des sources et fait une estimation sur la masse volumique des flots venant des unités de transfert.

3.1.3 Les marchés

Chaque marché est défini par sa localisation géographique, ainsi que par la demande et les prix des matières ou de l'énergie. Nous supposons que la fonction des prix est une fonction concave, linéaire par morceaux de la quantité vendue.

3.2 Les investissements

On prévoit des changements, suivant les périodes, concernant (1) le choix des combinaisons de collectes aux sources ; (2) l'existence des technologies aux sites. Ces changements impliquent des coûts appelés coûts d'investissement.

3.2.1 Choix de combinaisons de collectes

Investir dans une collecte sélective signifie sensibiliser les gens à cette collecte et acheter le matériel utilisé pour cette collecte. Nous avons évalué à une période la durée de vie du matériel utilisé dans les collectes sélectives. Par conséquent, pour chaque début de période, une nouvelle combinaison de collectes peut être choisie indépendamment des collectes choisies la période précédente. Lorsqu'une combinaison de collectes sélectives est choisie à une source, il lui correspond un coût de sensibilisation qui s'applique à l'ensemble de la population et un coût de combinaison qui s'applique aux matériels qu'on doit acheter.

3.2.2 Investissement dans les technologies

Chaque site peut contenir une seule technologie. Une technologie construite à un site y demeure tant que sa durée de vie n'est pas dépassée. La construction des technologies aux sites implique des coûts d'investissement. Généralement, on suppose une seule fonction d'investissement concave pour chaque technologie, décrivant une économie d'échelle. Au lieu d'une seule fonction d'investissement pour chaque technologie, nous distinguons deux types de fonctions concaves : l'une pour la construction initiale de la technologie et l'autre pour l'ajout de capacité à une technologie existante.

Comme ces fonctions concaves ne peuvent être intégrées dans un programme linéaire, elles sont approchées par des fonctions linéaires par morceaux. L'ordonnée

à l'origine et la pente de chaque segment linéaire correspondent respectivement au coût fixe et au coût variable d'investissement. Le coût fixe indique le montant fixe à déboursier lorsqu'on prend la décision de construire ou d'agrandir une technologie, tandis que le coût variable dépend de la capacité choisie. C'est en examinant la courbure de la fonction concave que l'utilisateur détermine le nombre de morceaux linéaires pour chaque technologie. La figure 3.6 illustre un exemple de fonction d'investissement pour la construction d'un incinérateur telle qu'évaluée par Kreith [31] : $y = 0.66187 * x^{0.6762}$ où x désigne la capacité en tonnes par jour et y désigne le coût d'investissement en millions de dollars de 1991. Pour cette courbe, nous proposons une approximation par deux segments de droites : $y = 0.075 * x$ et $y = 57.24 + 0.028 * x$.

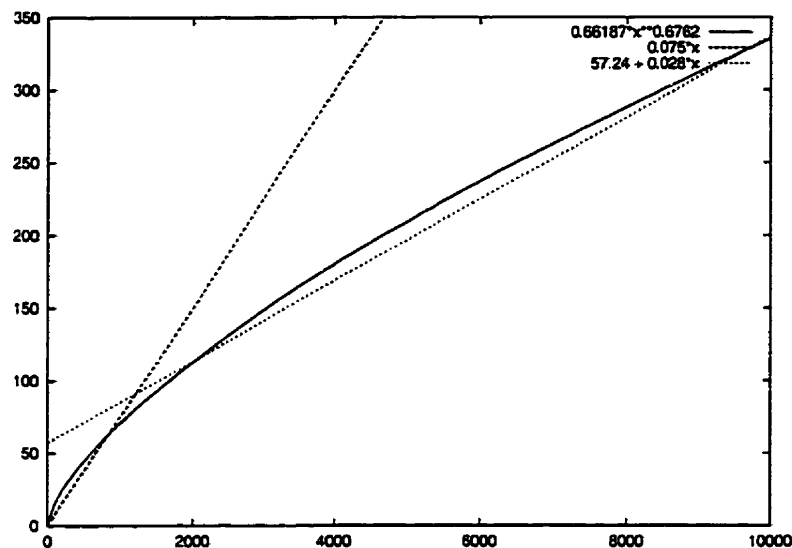


Figure 3.6 – Approximation linéaire d'une fonction d'investissement

La construction d'une technologie implique une acquisition de terrain. L'utilisateur doit fournir deux types de constantes pour chaque technologie : la superficie minimale et la superficie unitaire. La superficie minimale s'applique à la construction initiale d'une technologie, tandis que la superficie unitaire correspond à chaque unité de capacité construite initialement ou ajoutée.

3.3 Les fonctions objectifs

On a deux objectifs distincts : minimiser les coûts ou minimiser l'enfouissement. L'objectif principal est la minimisation des coûts. L'objectif de minimiser l'enfouissement sert de balise environnementale. Pour permettre à l'utilisateur d'utiliser les deux objectifs en même temps, nous avons défini une contrainte permettant de limiter la quantité totale enfouie. Il est donc possible de minimiser les coûts sans dépasser un seuil défini par l'utilisateur sur le volume total enfoui.

3.3.1 Minimiser les coûts

Le coût total du système est la somme actualisée des coûts d'investissement, des coûts d'opération et des coûts de maintenance. Les coûts d'investissement se rapportent à l'achat des sites, la construction et l'agrandissement des technologies de traitement et d'élimination, ainsi que la sensibilisation aux collectes sélectives et l'achat du matériel utilisé dans la collecte. Les coûts de maintenance sont les coûts fixes d'entretien des technologies existantes. Les coûts d'opération sont les coûts variables se rattachant à l'activité des modes de collectes, des modes de transport et des technologies de traitement et élimination. Dans le calcul du coût total du système, le modèle tient compte de la vente des produits aux marchés et des valeurs de rachat des technologies construites.

3.3.2 Minimiser l'enfouissement

Rappelons que l'horizon de planification doit être subdivisé en périodes d'un même nombre d'années. La quantité totale enfouie est la somme sur toutes les périodes des quantités enfouies annuellement en chaque période multipliée par le nombre d'années par période.

3.4 Le modèle

Le modèle construit est un modèle dynamique de programmation linéaire mixte. Les variables binaires désignent les décisions concernant le choix des combinaisons de collecte, l'augmentation de capacité pour les diverses technologies de traitement ou d'élimination. Les variables continues désignent les flots parcourant le système de référence de gestion de déchets, les niveaux d'activité des collectes et des installations, les capacités existantes, les capacités construites et les superficies occupées par les installations. Avant de décrire les contraintes et les fonctions économiques, énonçons d'abord les principales notations utilisées.

- T : ensemble des périodes ;
- S : ensemble des sources et des sources externes ;
- S_{ext} : ensemble des sources externes ;
- W : ensemble des types de déchets produits aux sources ;
- Col : ensemble des types de collectes sélectives ;
- S_v : sac vert ou collecte régulière ;
- $Comb$: ensemble des combinaisons de collectes sélectives ;
- Prc : ensemble des procédés de traitement, transfert ou enfouissement ;
- $Site$: ensemble des localisations de procédés existantes ou potentielles ;
- Mat : ensemble des types de matières produites aux unités de traitement ;
- E : ensemble des différentes formes d'énergie produites aux unités de traitement ;
- P : ensemble de types de produits susceptibles d'être vendus,
 $P = Col \cup Mat \cup E$;
- M : ensemble des marchés.

D'autres notations seront utilisées et définies au fur et à mesure de leur introduction. Pour simplifier la présentation des contraintes, nous omettons les détails sur les calculs de paramètres issus des données fournies par l'utilisateur.

3.4.1 Les contraintes

La solution optimale choisie doit satisfaire à un certain nombre de contraintes techniques. Nous définissons également des contraintes environnementales pour pouvoir tenir compte des impacts sociaux et environnementaux.

Les contraintes techniques

Les contraintes définies dans le modèle sont des contraintes de bilan, des contraintes de capacité et des contraintes d'investissement. Les contraintes de bilan servent à comptabiliser les flots quittant chaque source, les intrants et extrants de chaque site. Les contraintes de capacités servent à créer une relation entre les variables représentant les activités et celles représentant les capacités des modes opératoires, des modes de collectes ou des modes de transport. Les contraintes d'investissement relient les variables représentant les capacités, les investissements et les variables de décisions relatives aux investissements.

Les quantités collectées aux sources

Les trois contraintes suivantes assurent qu'à chaque source et à chaque période une seule combinaison de collecte est choisie à la fois et que tous les déchets produits sont ramassés.

$$\sum_{(c \in Comb[s])} EX_co(c, s, t) = 1, (\forall s \in (S \setminus S_ext), \quad \forall t \in T); \quad (3.1)$$

$$Q_{cs}(col, s, t) = q(s, t) \sum_{w \in W} \delta_{cs}(w, col, s, t) \sum_{\substack{(c \in Comb): \\ (col \in Col[c])}} EX_co(c, s, t), \quad (3.2)$$

$$(\forall s \in (S \setminus S_ext), \quad \forall col \in Col, \quad \forall t \in T);$$

$$Q_{sv}(c, s, t) = q(s, t) \sum_{w \in W} \delta_{sv}(w, c, s, t) EX_co(c, s, t) \quad (3.3)$$

$$(\forall s \in (S \setminus S_ext), \quad \forall c \in Comb[s], \quad \forall t \in T);$$

où

$EX_co(s, c, t)$: variable binaire prenant la valeur 1 si la combinaison c est choisie à la source s au début de la période t et 0, sinon ;

$Q_{cs}(col, s, t)$: quantité de matières collectées annuellement au moyen de la collecte sélective col à la source s durant la période t ;

$Q_{sv}(c, s, t)$: quantité de matières collectées annuellement au moyen du sac vert résiduel de la combinaison c , à la source s , durant la période t ;

$Comb[s]$: ensemble des combinaisons de collectes sélectives possibles à la source s ;

$Col[c]$: ensemble de collectes sélectives composant la combinaison c ;

$q[s, t]$: quantité de déchets produits à la source s (non externe) pendant la période t ;

$\delta_{cs}[w, col, s, t]$: taux de diversion de la matière w par la collecte sélective col à la source s , pendant la période t ;

$\delta_{sv}(w, comb, s, t)$: proportion de la matière w produite à la source s pendant la période t , qui ne serait pas ramassée par les collectes sélectives si la combinaison c est choisie.

La relation (3.1) oblige le modèle à choisir une et une seule combinaison à chaque source au début de chaque période. La relation (3.2) calcule la quantité totale en tonne obtenue annuellement au moyen de chaque collecte sélective à partir de chaque source à chaque période. La relation (3.3) fournit la quantité de déchets qui doit être collectée annuellement au moyen de la collecte régulière résiduelle de chaque combinaison à chaque source et en chaque période. Les quantités $\delta_{cs}[w, col, s, t]$ et $\delta_{sv}(w, comb, s, t)$ sont déduites de quatre types de paramètres fournis par l'utilisateur. Ces paramètres sont : la proportion de chaque matière dans les déchets produits à chaque source en chaque période, la proportion de chaque source qui serait desservie par chaque collecte sélective, le taux de participation de chaque source à chaque collecte sélective et le taux de saisie de chaque matière par chaque collecte sélective. Les paramètres $q[s, t]$ indiquant la génération des déchets aux sources sont également fournis par l'utilisateur.

Allocation des collectes aux sites et aux marchés

Les quatre contraintes suivantes assurent que toutes les matières ramassées sont dirigées vers les sites ou les marchés. Suivant le type de technologie construite à chaque site, les matières envoyées à ce site sont destinées au traitement, au transfert ou à l'enfouissement.

$$Q_{cs}(col, s, t) = \sum_{d \in Site} \left(\begin{array}{c} F_{csv}(col, s, d, t) \\ + F_{csd}(col, s, d, t) \end{array} \right) + \sum_{d \in M} F_{sm}(col, s, d, t), \quad (3.4)$$

$$(\forall s \in (S \setminus S_{ext}), \quad \forall col \in Col, \quad \forall t \in T);$$

$$Q_{sv}(c, s, t) = \sum_{d \in Site} \left(\begin{array}{c} F_{svv}(c, s, d, t) + F_{svd}(c, s, d, t) \\ + F_{sve}(c, s, d, t) + F_{svt}(c, s, d, t) \end{array} \right) \quad (3.5)$$

$$(\forall s \in (S \setminus S_{ext}), \quad \forall c \in Comb[s], \quad \forall t \in T);$$

$$q_{cs}(col, s, t) \geq \sum_{d \in Site} [F_{csv}(col, s, d, t) + F_{csd}(col, s, d, t)], \quad (3.6)$$

$$(\forall s \in S_{ext}, \quad \forall col \in Col, \quad \forall t \in T);$$

$$q_{sv}(c, s, t) \geq \sum_{d \in Site} \left(F_{svv}(c, s, d, t) + F_{svd}(c, s, d, t) + F_{sve}(c, s, d, t) + F_{svt}(c, s, d, t) \right) \quad (3.7)$$

$(\forall s \in S_{ext}, \quad \forall c \in Comb[s], \quad \forall t \in T).$

où

- $F_{csd}(col, s, site, t)$: quantité de matières acheminées annuellement, au moyen de la collecte sélective *col*, de la source *s* au site *site* durant la période *t*. Ces matières sont traitées par une technologie de la classe *Det* ;
- $F_{svd}(c, s, site, t)$: quantité de matières acheminées annuellement, au moyen du sac vert résiduel de la combinaison *c*, de la source *s* au site *site* durant la période *t* et traitées par une technologie de la classe *Det* ;
- $F_{csv}(col, s, site, t)$: quantité de matières acheminées annuellement, au moyen de la collecte sélective *col*, de la source *s* au site *site* durant la période *t* et traitées par une technologie des classes *Recette* ou *Moy* ;
- $F_{svv}(c, s, site, t)$: quantité de matières acheminées annuellement, au moyen du sac vert résiduel de la combinaison *c*, de la source *s* au site *site* durant la période *t* et traitées par une technologie des classes *Recette* ou *Moy* ;
- $F_{sve}(c, s, site, t)$: quantité de matières acheminées annuellement, au moyen du sac vert résiduel de la combinaison *c*, de la source *s* au site *site* durant la période *t*, pour y être enfouies ;
- $F_{svt}(c, s, site, t)$: quantité de matières acheminées annuellement, au moyen du sac vert résiduel de la combinaison *c*, de la source *s* au site *site* durant la période *t*, pour un transfert avant l'enfouissement ;

- $F_{sm}(col, s, m, t)$: quantité de matières ramassées au moyen de la collecte sélective col et vendues au marché m à partir de la source s , durant la période t ;
- $q_{cs}[col, s, t]$: disponibilité de matières obtenues par la collecte col à la source externe s pendant la période t ;
- $q_{sv}[c, s, t]$: disponibilité de matières obtenues par le sac vert résiduel de la combinaison c à la source externe s pendant la période t .

Les contraintes (3.4) imposent que les collectes sélectives aient pour destination les sites et les marchés. Les contraintes (3.5) obligent les matières provenant de la collecte régulière à être conduites aux sites. Il est important de connaître les quantités de matières disponibles à chaque source externe, pour chaque mode de collecte utilisé. La quantité de matières conduites aux sites à partir des sources externes est limitée par la quantité disponible (contraintes (3.6) et (3.7)).

Les intrants des sites de traitement

Rappelons que trois classes distinctes de technologies de traitement sont définies : *Recette*, *Det* et *Moy*. Pour les technologies de la classe *Recette*, les modes opératoires sont connus et l'utilisateur doit fournir la proportion de chaque type de flot utilisée par unité d'activité de chaque mode opératoire.

Pour les technologies de la classe *Det*, les modes opératoires sont associés aux matières. Comme les matières venant des sources ne peuvent être dissociées, à moins d'être collectées séparément, elles ne peuvent pas être mélangées individuellement avec d'autres matières. Par conséquent, la proportion de chaque matière par unité d'activité de chaque mode opératoire d'une technologie de classe *Det* prend les valeurs 0 ou 1.

Pour les technologies de la classe *Moy* l'entrée des données suppose la connaissance des informations concernant les extrants de chaque type de matières et le modèle évalue les extrants de chaque type de flots agrégés en se servant de leur composition. Par exemple la valeur calorifique d'un flot agrégé est la moyenne des valeurs calorifiques des matières composant ce flot. Cette conversion suppose qu'un mode opératoire utilisant une matière agrégée n'implique pas d'autres matières. Les modes opératoires sont associés aux types de flots. La proportion de chaque type flot par unité d'activité de chaque mode opératoire est égale à 1 si le type de flot est associé au mode opératoire et 0 autrement.

Il est possible de considérer des regroupements de matières pour définir les modes opératoires. Par exemple, dans les technologies de compostage, la collecte sélective du papier aux sources joue le même rôle que le papier rejeté par les centres de tri. Les flots de matières et les flots agrégés peuvent être regroupés pour faciliter la définition des modes opératoires des technologies de la classe *Recette*. Les matières venant des sources peuvent être regroupées entre elles pour faciliter la définition des modes opératoires des technologies de la classe *Det* ou l'entrée des données pour les modes opératoires des technologies de la classe *Moy*. Comme le montre la figure 1.3, les matières conduites aux sites sont soit utilisées directement par les modes opératoires ou bien comptabilisées d'abord à l'intérieur des regroupements de matières.

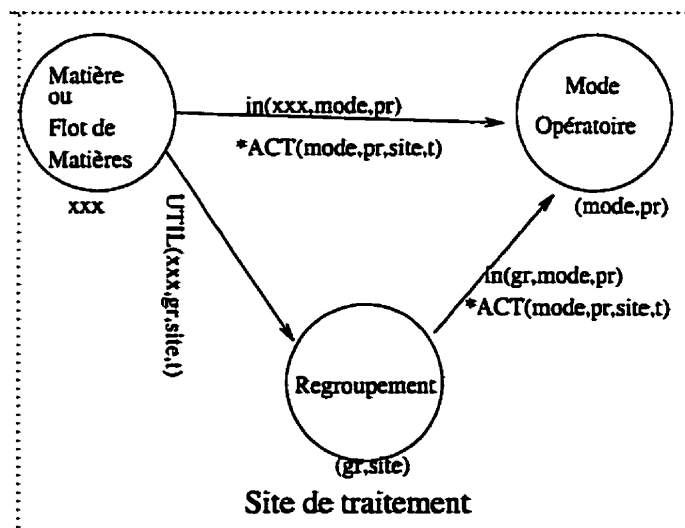


Figure 3.7 – Regroupement de matières

Les contraintes suivantes obligent la répartition des intrants d'un site aux modes opératoires de la technologie existante au site.

$$\begin{aligned}
& \sum_{(pr \in Recette)} \sum_{(mod \in Mod[pr])} ACT(mod, pr, site, t) * in(col, mod, pr, t) \\
& + \sum_{\substack{(prc \in Moy): \\ (col \in Mod[prc])}} ACT(col, prc, site, t) + \sum_{\substack{(gr \in Gr): \\ (col \in Mat[gr])}} UTIL(col, gr, site, t) \\
& = \sum_{s \in S} F_{csv}(col, s, site, t), \quad (\forall col \in COL \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T);
\end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{(pr \in Recette)} \sum_{(mod \in Mod[pr])} ACT(mod, pr, site, t) * in(c, mod, pr, t) \\
& + \sum_{\substack{(prc \in Moy): \\ (c \in Mod[prc])}} ACT(c, prc, site, t) + \sum_{\substack{(gr \in Gr): \\ (c \in Mat[gr])}} UTIL(c, gr, site, t) \\
& = \sum_{\substack{s \in S: \\ c \in Comb[s]}} F_{svu}(c, s, site, t), \quad (\forall c \in Comb, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T);
\end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{\substack{(prc \in Det): \\ (w \in Mod[prc])}} ACT(w, prc, site, t) + \sum_{\substack{(gr \in Gr): \\ (w \in Mat[gr])}} UTIL(w, gr, site, t) \\
& = \sum_{s \in S} \left(\sum_{c \in Comb[s]} F_{svd}(c, s, site, t) \rho_{sv}(w, c, s, t) \right. \\
& \quad \left. + \sum_{col \in Col} F_{csd}(col, s, site, t) \rho_{cs}(w, col, s, t) \right) \\
& (\forall w \in W, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T);
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{(pr \in Prc)} \sum_{(mod \in Mod[pr])} ACT(mod, pr, site, t) * in(mat, mod, pr, t) \\
& + \sum_{\substack{(gr \in Gr): \\ (mat \in Mat[gr])}} UTIL(mat, gr, site, t) = \sum_{org \in Site} F_{ii}(mat, org, site, t), \\
& (\forall mat \in Mat, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T);
\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{(pr \in Prc)} \sum_{(mod \in Mod[pr])} ACT(mod, pr, site, t) * in(gr, mod, pr, t) \\
& = \sum_{mat \in (Mat \cup W \cup Col \cup Comb)} UTIL(mat, gr, site, t) \\
& (\forall gr \in Gr, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T);
\end{aligned} \tag{3.12}$$

où

- $F_{ii}(mat, org, dest, t)$: quantité de matière mat transportée du site intermédiaire org au site intermédiaire $dest$ durant la période t ;
- $ACT(mod, prc, site, t)$: activité du mode opératoire mod du procédé prc au site $site$ durant la période t ;
- $UTIL(mat, gr, site, t]$: quantité de matières mat traitée comme groupe gr au site $site$ pendant la période t .
- $in(xx, mod, prc, t)$: proportion du flot xx , par unité d'activité du mode opératoire mod , des technologies prc ;
- $\rho_{cs}[w, col, s, t]$: proportion de la matière w dans les matières obtenues par la collecte col à la source s durant la période t ;
- $\rho_{sv}[w, comb, s, t]$: proportion de la matière w dans les matières restant dans le sac vert résiduel de la combinaison $comb$ à la source s durant la période t ;
- Gr : ensemble de regroupement de matières;
- $Mat[gr]$: ensemble de types de flots ou de matières composant le regroupement gr .

Il est nécessaire de connaître la composition des flots agrégés pour le calcul des intrants des sites abritant les technologies de la classe *Det* et les extrants des sites abritant les technologies de la classe *Moy*. Ainsi, les paramètres $\rho_{cs}[w, col, s, t]$ et $\rho_{sv}[w, comb, s, t]$ doivent être fournis pour les matières agrégées venant des sources externes. Pour les flots venant des sources, ces paramètres se déduisent des paramètres $\delta_{cs}[w, col, s, t]$ et $\delta_{sv}[w, comb, s, t]$.

Les contraintes (3.8) et (3.9) relient les variables d'activités des modes opératoires des technologies des classes *Recette* ou *Moy* avec les variables de flots

$F_{csv}(col, s, site, t)$ et $F_{svv}(col, s, site, t)$. Lorsque la technologie construite au site n'appartient pas à l'une de ces deux classes, ces variables de flots s'annulent. De la même façon, les variables de flots $F_{csd}(col, s, site, t)$ et $F_{svd}(col, s, site, t)$ sont reliées par les contraintes (3.10) aux variables d'activités des modes opératoires des technologies de la classe *Det* et s'annulent lorsque aucune technologie de cette classe n'est construite au site.

Les matières conduites à un site à partir d'autres sites sont comptabilisées par les contraintes (3.11). Les contraintes (3.12) lient les matières groupées aux activités des modes opératoires des technologies existantes à un site.

Les intrants des sites de transfert

Les contraintes suivantes expriment le lien entre les matières arrivant à un site pour y être transférées et l'activité des différents modes opératoires des technologies de transfert. Ces modes opératoires sont reliés aux catégories de sources pour nous permettre de retracer l'origine des matières.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{s \in S[cat]} \sum_{c \in Comb[s]} F_{svt}(c, s, site, t) \\
 &= \sum_{\substack{prc \in Ts: \\ cat \in Mod[prc]}} ACT[cat, prc, site, t] \\
 & (\forall cat \in Cat_{ts}, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T);
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

où :

- Cat_{ts} : ensemble des modes opératoires des technologies de transfert,
ou de catégories de sources correspondantes;
- $S(cat)$: ensemble des sources composant la catégorie cat .

Les contraintes suivantes éliminent les flots venant des sources n'appartenant pas aux catégories de sources définies (correspondant aux technologies de transfert).

$$\begin{aligned} \sum_{s \in S^*} \sum_{c \in Comb[s]} F_{sut}(c, s, site, t) &= 0 \\ (\forall site \in Site, \quad \forall t \in T); \end{aligned} \quad (3.14)$$

où :

$$S^* = S \setminus \left\{ \bigcup_{cat \in Cat_{ts}} S(cat) \right\}.$$

Les extrants des sites intermédiaires

Rappelons que les extrants des unités de traitement sont soit des matières qui doivent être envoyées aux autres sites ou vendues aux marchés ou bien de l'énergie qui peut être vendue au marché. Les matières qui quittent un site de transfert sont rattachées aux catégories de sources définies préalablement pour permettre de retracer approximativement leurs origines.

$$\begin{aligned} &\sum_{(pr \in Proc)} \sum_{(mod \in Mod[pr])} ACT(mod, pr, site, t) * out(mat, mod, pr, t) \\ &= \sum_{d \in Site} [F_{ii}(mat, site, d, t) + F_{ie}(mat, site, d, t)] \\ &+ \sum_{d \in M} F_{im}(mat, site, d, t) \\ &(\forall mat \in Mat, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T); \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} &\sum_{(pr \in Proc)} \sum_{(mod \in Mod[pr])} ACT(mod, pr, site, t) * out(ener, mod, pr, t) \\ &\leq \sum_{dest \in M} F_{im}(ener, site, dest, t) \\ &(\forall ener \in E, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T); \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{\substack{prc \in Ts: \\ cat \in Mod[prc]}} ACT[cat, prc, site, t] \\
&= \sum_{dest \in Site} F_{ie}(cat, site, dest, t), \\
& (\forall cat \in Cat_{ts}, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T);
\end{aligned} \tag{3.17}$$

où

$out[p, mod, prc, t]$: quantité d'extrant p produite par unité d'activité du mode opératoire mod des technologies prc ;
 $F_{im}(p, site, m, t)$: quantité d'extrant p vendue au marché m à partir du site $site$ durant la période t .

Pour les technologies de la classe *Moy*, les quantités d'extrants des matières agrégées sont obtenues en faisant une moyenne sur les extrants des matières composantes. Plus précisément, on a :

$out_mat[p, w, prc]$: quantité de produit p générée par unité de traitement de la matière $w \in W$ par la technologie $prc \in Moy$;

$\rho_{csm}[w, col, t]$: proportion moyenne de la matières w dans les collectes col durant la période t ;

$\rho_{sum}[w, comb, t]$: proportion moyenne de la matières w dans les collectes résiduelles de la combinaison $comb$ durant la période t ;

$$\begin{aligned}
out(p, col, prc, t) &= \sum_{w \in W} \rho_{csm}[w, col, t] * out_mat[p, w, prc] \\
& (\forall prc \in Moy, \forall col \in (Col \cap Mod[prc]), \forall t \in T);
\end{aligned}$$

$$out(p, comb, prc, t) = \sum_{w \in W} \rho_{sum}[w, comb, t] * out_mat[p, w, prc]$$

$$(\forall prc \in Moy, \forall comb \in (Comb \cap Mod[prc], \forall t \in T).$$

Les contraintes (3.15) exigent l'enlèvement de toutes les matières produites aux sites de traitement. Les contraintes (3.16) permettent d'obtenir la quantité d'énergie produite aux sites de traitement. Les contraintes (3.17) obligent que les matières transférées soient conduites aux sites d'enfouissement.

Le volume enfoui annuellement

L'activité d'enfouissement est définie à partir du volume occupé par les matières enfouies. Les matières enfouies proviennent des sources, des unités de traitement ou des unités de transbordement. La contrainte suivante permet de calculer le volume total enfoui annuellement à chaque site.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{s \in S} \sum_{comb \in Comb[s]} F_{sve}(comb, s, site, t) * r_{sv} / \mu_{sv}[comb, s, t] \\
 & + \sum_{org \in Site} \sum_{mat \in Mat} F_{ie}(mat, org, site, t) / \mu[mat] \\
 & + \sum_{org \in Site} \sum_{cat \in Cat_{ts}} F_{ie}(cat, org, site, t) * r_{ts} / \mu[cat] \\
 & = \sum_{enf \in Enf} ACT(enf, enf, site, t), \quad (\forall site \in Site, \quad \forall t \in T);
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

où :

- $\mu[mat]$: masse volumique de la matière *mat* produite aux sites;
- $\mu_{sv}(comb, s, t)$: masse volumique de la collecte régulière résiduelle de la combinaison *comb* à la source *s* durant la période *t*. Elle dépend de la proportion et de la masse volumique de chaque matière obtenue à partir de cette collecte;
- $\mu[cat]$: moyenne des masses volumiques des sacs verts purs des sources faisant partie de la catégorie *cat*;

- r_{sv} : facteur de réduction de volume dû aux véhicules utilisés dans la collecte régulière;
 r_{ts} : facteur de réduction de volume par les procédés de transbordement;
 enf : représente le procédé et le mode opératoire d'enfouissement.

La contrainte suivante permet de calculer la masse totale de chaque matière enfouie annuellement à tous les sites.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{site \in Site} \left[\sum_{s \in S} \sum_{c \in Comb[s]} \rho_{sv}(mat, c, s, t) * \left(\begin{array}{c} F_{sve}(c, s, site, t) \\ + F_{svt}(c, s, site, t) \end{array} \right) \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{org \in Site} F_{ie}(mat, org, site, t) \right] \\
 & = Q_{enf}(mat, t), \\
 & (\forall mat \in (W \cup Mat), \forall t \in T);
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

$Q_{enf}(mat, t)$: quantité de matière mat enfouie annuellement durant la période t .

Contraintes de capacité

Les contraintes suivantes établissent des relations entre les variables d'activité et les variables de capacité. Les activités des modes opératoires d'une technologie dépendent de la capacité disponible de cette technologie. De la même façon, l'activité d'un mode de collecte ou de transport est limitée par sa capacité.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{mod \in Mod[prc]} ACT(mod, prc, site, t) \geq \underline{\lambda}(prc) * CAP(site, prc, t), \\
 & \sum_{mod \in Mod[prc]} ACT(mod, prc, site, t) \leq \bar{\lambda}(prc) * CAP(site, prc, t), \\
 & (\forall prc \in (Prc \setminus Enf), \forall site \in Site, \forall t \in T);
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

$$ACT(mod, prc, site, t) \leq \lambda(mod, prc) * CAP(site, prc, t) \quad (3.21)$$

$$(\forall prc \in Prc, \quad \forall mod \in Mod[prc], \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T);$$

$$ACT(mod, pr, site, t) \geq \underline{\lambda}_{op}(mod, pr) * \sum_{mo \in Mod[pr]} ACT(mo, pr, site, t),$$

$$ACT(mod, pr, site, t) \leq \bar{\lambda}_{op}(mod, pr) * \sum_{mo \in Mod[pr]} ACT(mo, pr, site, t), \quad (3.22)$$

$$(\forall pr \in Prc, \quad \forall mod \in Mod[pr], \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T);$$

$$\sum_{\tau=1}^t app * ACT(enf, enf, site, \tau) \leq CAP(enf, site, t), \quad (3.23)$$

$$(\forall enf \in Enf, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T);$$

$$\sum_{s \in (S \setminus S_{ext})} Q_{cs}(col, s, t) \leq CAP_T(col, t), \quad (\forall col \in Col, \quad \forall t \in T); \quad (3.24)$$

$$\sum_{org \in Site} \sum_{d \in Site} \sum_{mat \in Mat[v]} [F_ii(mat, org, d, t) + F_ie(mat, org, d, t)] \quad (3.25)$$

$$\leq CAP_T(v, t), \quad (\forall v \in V, \quad \forall t \in T);$$

où

- app : nombre d'années par période;
- $\lambda[prc]$: taux minimal d'utilisation de la capacité de la technologie prc ;
- $\bar{\lambda}[prc]$: taux maximal d'utilisation de la capacité de la technologie prc ;
- $\lambda[mod, prc]$: proportion maximale de la capacité de la technologie prc destinée à l'usage du mode opératoire mod ;
- $\underline{\lambda}_{op}[mod, prc]$: borne inférieure du rapport entre l'activité du mode opératoire mod et l'activité totale des procédés prc ;
- $\bar{\lambda}_{op}[mod, prc]$: borne supérieure du rapport entre l'activité du mode opératoire mod et l'activité totale des procédés prc ;

- $CAP_T[trn, t]$: activité total du mode de collecte ou du mode de transport trn pendant la période t ;
- V : ensemble des types de véhicules utilisés à partir des destinations intermédiaires;
- $Mat[v]$: ensemble des matières affectées au type de véhicules v ;
- $CAP(site, prc, t)$: capacité en tonnes du procédé de traitement ou de transfert ou capacité cummulative en m^3 du procédé d'enfouissement prc au site $site$ durant la période t .

Les contraintes (3.20) traduisent la relation entre l'activité totale d'un procédé et sa capacité. Il peut exister un seuil minimal de capacité qui doit être atteint et un seuil maximal qui ne doit pas être dépassé par l'activité totale. Les contraintes (3.21) établissent un lien entre les variables représentant les activités des modes opératoires d'une technologie et la variable représentant sa capacité : il peut exister une portion réservée à chaque mode opératoire. Les contraintes (3.22) permettent de créer une relation entre l'activité d'un mode opératoire d'une technologie et l'activité totale de la technologie. Les contraintes (3.23) limitent le volume cumulatif enfoui à un site d'enfouissement par la capacité du site. Les contraintes (3.24) permettent de calculer l'activité totale de chaque mode de collecte. Les contraintes (3.25) aident à calculer l'activité total de chaque mode de transport utilisé à partir des sites intermédiaires.

La vente aux marchés

Les matières recyclables produites aux centres de tri, les collectes de matières recyclables aux sources, le compost produit aux unités de compostage et l'énergie produite par les incinérateurs peuvent être vendus aux marchés. Un marché peut accepter plusieurs types de produits. À chaque matière correspond une demande et une fonction concave linéaire par morceaux définissant son prix.

Les contraintes suivantes expliquent, pour chaque matière, la répartition des

quantités achetées aux différents segments de prix.

$$\begin{aligned} VENTE(p, m, k, t) &\leq lim(p, k, m), \\ (\forall p \in P, \quad \forall m \in M, \quad \forall k \in K_prix[p, m]); \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K_prix(p, m)} VENTE(p, m, k, t) &\leq dem(p, m, t), \\ (\forall p \in P, \quad \forall m \in M); \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K_prix(p, m)} VENTE(p, m, k, t) &= \left[\begin{aligned} &\sum_{site \in Site} F_ii(p, site, m, t) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{p \in COL} F_cs(p, s, m, t) \end{aligned} \right] \\ (\forall p \in P, \quad \forall m \in M); \end{aligned} \quad (3.28)$$

où :

- $dem(p, m, t)$: demande maximale du produit p au marché m durant la période t
- $K_prix(p, m)$: ensemble des segments de prix pour le produit p au marché m ;
- $lim(p, k, m)$: longueur du segment k de prix du produit p au marché m ;
- $VENTE(p, m, k, t)$: quantité de produit p vendu au prix k au marché m durant la période t .

La contrainte (3.26) impose des limites aux quantités vendues dans chaque segment. La contrainte (3.27) limite la quantité totale vendue par la demande maximale. La contrainte (3.28) égalise la quantité vendue à la quantité totale conduite au marché à partir de différentes sources ou différents sites.

Contraintes d'investissement

Les contraintes suivantes décrivent les relations entre les variables de capacité, les variables d'investissement et les variables binaires de décision. Les variables binaires traduisent l'existence, la décision de construire pour la première fois et la décision d'agrandir une technologie à un site au début d'une période donnée. Rappelons qu'aux deux types d'investissement correspondent deux types de fonctions concaves et qu'une hypothèse limite à 1 le maximum d'installations pouvant exister à un site.

$$CAP(site, prc, t) = resid[prc, site, t] + \sum_{\tau=\max(t-vie(prc)+1,1)}^t \left[\sum_{k \in K_cons(prc)} INV_c(site, prc, k, \tau) + \sum_{k \in K_aug(prc)} INV_a(site, prc, k, \tau) \right], \quad (3.29)$$

($\forall prc \in Prc, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T$);

$$CAP(site, prc, t) \leq cap_max[prc] * EX_pr(site, prc, t) \quad (3.30)$$

($\forall prc \in Prc, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T$);

$$CAP(site, prc, t) \geq cap_min[prc] * EX_pr(site, prc, t) \quad (3.31)$$

($\forall prc \in Prc, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T$);

$$\sum_{k \in K_cons[prc]} D_cons(site, prc, k, t) + EX_pr(site, prc, t-1) \leq 1 \quad (3.32)$$

($\forall prc \in Prc, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T$);

$$\sum_{k \in K_aug[prc]} D_aug(site, prc, k, t) \leq EX_pr(site, prc, t-1) \quad (3.33)$$

($\forall prc \in Prc, \quad \forall site \in Site, \quad \forall t \in T$);

$$INV_a(site, prc, k, t) \leq Grand_M * D_aug(site, prc, k, t) \quad (3.34)$$

($\forall prc \in Prc, \quad \forall site \in Site, \quad \forall k \in K_aug[prc], \quad \forall t \in T$);

$$INV_c(site, prc, k, t) \leq Grand_M * D_cons(site, prc, k, t) \quad (3.35)$$

($\forall prc \in Prc, \quad \forall site \in Site, \quad \forall k \in K_cons[prc], \quad \forall t \in T$);

$$\sum_{prc \in PRC} \left[\frac{sup_min(prc) EX_pr(site, prc, t)}{+ sup_unit(prc) CAP(site, prc, t)} \right] \leq superficie(site) \quad (3.36)$$

$(\forall site \in Site, \quad \forall t \in T);$

$$\sum_{prc \in Prc} EX_pr(site, prc, t) \leq 1, \quad (\forall site \in Site, \quad \forall t \in T); \quad (3.37)$$

où

$$EX_pr(site, prc, t) = \begin{cases} 1, & \text{si la technologie } prc \text{ existe à l'endroit } site \\ & \text{au début de la période } t \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$D_cons(site, prc, k, t) = \begin{cases} 1, & \text{si une capacité contenue dans le segment } k \\ & \text{est ajoutée à la technologie } prc \text{ inexistante} \\ & \text{à l'endroit } site \text{ au début de la période } t \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$D_aug(site, prc, k, t) = \begin{cases} 1, & \text{si une capacité contenue dans le segment } k \\ & \text{est ajoutée à la technologie } prc \text{ existante} \\ & \text{à l'endroit } site \text{ au début de la période } t \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$K_cons(prc)$: ensemble de segments utilisés dans l'approximation de la fonction du coût d'installation d'un procédé prc ;

$K_aug(prc)$: ensemble de segments utilisés dans l'approximation de la fonction du coût d'expansion d'un procédé prc ;

$INV_c(site, prc, k, t)$: capacité d'une nouvelle technologie prc construite au site $site$ au début de la période t . Cette capacité est choisie dans le segment k ;

$INV_a(site, prc, k, t)$: capacité, choisie dans le segment k , ajoutée à la technologie prc au site $site$ au début la période t .

$resid[prc, site, t]$: capacité résiduelle de la capacité initiale de la technologie prc à l'endroit $site$, au début de la période t ;

- $cap_min[prc]$: désigne la borne inférieure de la capacité d'une technologie prc , lorsqu'on choisit de la construire ;
 $cap_max[prc]$: désigne la borne supérieure des variables de capacité correspondant à la technologie prc ;
 $Grand_M$: désigne un nombre positif très grand ;
 $vie(prc)$: durée de vie des procédés prc ;
 $sup_min(prc)$: superficie minimale requise pour l'installation d'un procédé prc ;
 $sup_unit(prc)$: superficie occupée par chaque unité de capacité d'un procédé prc ;
 $superficie(site)$: superficie totale du site $site$.

Les contraintes (3.29) expriment le fait que la capacité existante d'une technologie à un site durant une période donnée est la somme de la capacité résiduelle et des investissements faits au début de la période ou au courant des périodes précédentes, dans un intervalle de temps ne dépassant pas la durée de vie. La durée de vie des sites d'enfouissement est supposée être infinie. Un investissement consiste soit en une construction initiale ou en une augmentation de capacité.

Les contraintes (3.34) et (3.35) relient les variables d'investissement aux variables de décision correspondantes car il peut y avoir une différence entre les coûts impliqués par une construction initiale et les coûts impliqués par une augmentation de capacité. Les contraintes (3.31) et (3.30) bornent la capacité existante de chaque technologie.

Les contraintes (3.32) obligent les variables $D_cons(site, prc, k, t)$ à prendre la valeur 0 si une capacité est installée. Les contraintes (3.33) forcent les variables de décision $D_aug(site, prc, k, t)$ à prendre la valeur 0 si aucune capacité n'est installée. Les contraintes (3.36) empêchent le dépassement des superficies disponibles aux sites.

Finalement, les relations (3.37) interdisent la construction de plusieurs technologies sur un site. Comme le montrent les contraintes précédentes, ceci n'interdit pas des investissements futurs car l'existence d'une technologie à un site est limitée par sa durée de vie et, lorsqu'une technologie est construite à une période donnée, sa capacité peut être augmentée ultérieurement.

Contraintes environnementales

Les contraintes suivantes établissent des balises environnementales.

$$\sum_{site \in Site} \sum_{s \in (S \setminus S_{-ext})} \sum_{c \in Comb[s]} F_{sve}(c, s, site, t) + F_{svt}(c, s, site, t) \leq (1 - div_min[t]) * \sum_{s \in (S \setminus S_{-ext})} q(s, t), \quad (\forall t \in T). \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} INV_a(site, prc, k, t) &= 0 \\ (\forall prc \in Prc, \quad \forall site \in Site : ind(site, prc) < limite), \\ (\forall k \in K_{aug}[prc], \quad \forall t \in T); \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} INV_c(site, prc, k, t) &= 0, \\ (\forall prc \in Prc, \quad \forall site \in Site : ind(site, prc) < limite), \\ (\forall k \in K_{cons}[prc], \quad \forall t \in T); \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{site \in Site} \sum_{enf \in Enf} app * ACT(enf, enf, site, t) \leq enf_max; \quad (3.41)$$

$$\sum_{site \in Site} \sum_{pr \in Prc} \left(\begin{aligned} &ind[site, pr] * EX_pr(site, pr, t) \\ &+ ind_act[pr] * \sum_{mod \in Mod[pr]} ACT(mod, pr, site, t) \end{aligned} \right) \geq l[t], \quad (\forall t \in T); \quad (3.42)$$

où

$div_min[t]$: désigne le taux minimal de diversion pendant la période t ;

- $ind(site, prc)$: indice environnemental global associé à l'existence de la technologie prc à l'endroit $site$;
- $ind_act[prc]$: indice environnemental global associé à l'activité des technologies prc ;
- $limite$: désigne la limite inférieure sur les indices environnementaux acceptables ;
- $l[t]$: désigne la limite sur la somme des impacts environnementaux des technologies existantes en période t ;
- enf_max : désigne la limite supérieure sur le volume total enfoui.

Les contraintes (3.38) servent à limiter le rapport entre les quantités de matières enfouies directement et les matières produites annuellement aux sources. Les contraintes (3.39) et (3.40) interdisent d'investir dans des technologies pour lesquelles les indices environnementaux globaux n'atteignent pas la norme établie. Les contraintes (3.41) permettent d'introduire une limite sur le volume total enfoui, pour tous les sites et toutes les périodes. Les contraintes (3.42) permettent d'introduire une limite sur la somme des impacts environnementaux des technologies existantes en chaque période.

3.4.2 Les objectifs

Deux fonctions objectifs sont disponibles. La première est l'expression du coût total actualisé du système, la seconde représente le volume total enfoui.

Le coût total actualisé du système

La fonction objectif représente la somme actualisée de tous les coûts du système moins la somme de tous les revenus provenant des ventes et la valeur de rachat des investissements. Elle est représentée par l'expression suivante :

$$\sum_{t \in T} (1 + a)^{app * (1-t)} \left\{ \begin{array}{l} INVEST(t) - RACHAT(t) \\ + \sum_{\tau=1}^{app} (1 + a)^{1-\tau} * [OPER_a(t) - REV_{vente}(t)] \end{array} \right\}$$

où :

- a : est le taux annuel d'actualisation;
- $OPER_a(t)$: est la somme des coûts annuels de collecte, transport, traitement et élimination pendant la période t ;
- $REV_{vente}(t)$: est la somme de tous les revenus annuels provenant des ventes des marchés pendant la période t ;
- $INVEST(t)$: est la somme des coûts des investissements effectués au début de la période t ;

$RACHAT(t)$: est la valeur de rachat des technologies. Elle correspond à la correction pour réduire le coût des investissements effectués durant la période t lorsqu'une partie de la durée de vie technique s'étend au-delà de l'horizon d'étude.

La somme des revenus des ventes est donnée par :

$$REV_vente(t) =$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K_{-}prix(p,m)} prix(p, m, k, t) * VENTE(p, m, k, t);$$

où :

$prix(p, m, k, t)$: prix unitaire du produit p au marché m pendant la période t , dans le $k^{ième}$ segment de prix.

Le calcul des valeurs de rachats est inspiré d'une formule développée par Fischbone et al. [19] :

$$RACHAT(t) =$$

$$a_t(N+1) \sum_{pr \in Proc} \sum_{site \in Site} rach[pr, t] *$$

$$\left\{ \sum_{k \in K_{-}cons[pr]} \left[\begin{aligned} &\left(\begin{aligned} &fix_cons[pr, k, t] \\ &+ sup_min[pr] * cout_t[site] \end{aligned} \right) * D_cons(site, pr, k, t) \\ &+ \left(\begin{aligned} &var_cons[pr, k, t] \\ &+ sup_unit[pr] * cout_t[site] \end{aligned} \right) * INV_c(site, pr, k, t) \end{aligned} \right] \right. \\ \left. + \sum_{k \in K_{-}aug[pr]} \left[\begin{aligned} &fix_aug[x, k, t] * D_aug(site, pr, k, t) \\ &+ \left(\begin{aligned} &var_aug[pr, k, t] \\ &+ sup_unit[pr] * cout_t[site] \end{aligned} \right) * INV_a(site, pr, k, t) \end{aligned} \right] \right\}$$

où :

N : nombre total de périodes;

$a_t(N+1)$: facteur d'actualisation par rapport à la période t ,
 des investissements disponibles à la période $N+1$;
 $crf(n)$: répartition annuelle de chaque unité d'investissement
 sur une durée de n périodes;
 $a_t(N+1) = (1+a)^{app(t-N-1)}$;
 $crf(n) = \frac{a}{[1 - (1+a)^{app+n}]}$;
 $rach(prc, t) = \begin{cases} 0, & \text{si } t + vie(prc) \leq N+1 \\ \frac{crf(vie(prc))}{crf(t+vie(prc)-N-1)}, & \text{sinon} \end{cases}$

La somme des coûts d'investissement est donnée par :

$$INVEST(t) =$$

$$\sum_{s \in (S \setminus S_ext)} \sum_{c \in Comb[s]} fix_co[s, c, t] * EX_co(s, c, t) + \sum_{site \in Site} \sum_{pr \in Prc}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k \in K_cons[pr]} \left[\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} fix_cons[pr, k, t] \\ + sup_min[pr] * cout_t[site] \end{array} \right) D_cons(site, pr, k, t) \\ + \left(\begin{array}{l} var_cons[pr, k, t] \\ + sup_unit[pr] * cout_t[site] \end{array} \right) INV_c(site, pr, k, t) \end{array} \right] \\ + \sum_{k \in K_aug[pr]} \left[\begin{array}{l} fix_aug[pr, k, t] D_aug(site, pr, k, t) \\ + \left(\begin{array}{l} var_aug[pr, k, t] \\ + sup_unit[pr] * cout_t[site] \end{array} \right) INV_a(site, pr, k, t) \end{array} \right] \end{array} \right\}$$

où :

$cout_t[site, t]$: le coût unitaire du terrain au site $site$ en période t ;
 $fix_co[s, c, t]$: la somme des coûts des investissements, pour la combinaison c à la source s , pendant la période t ;

$fix_cons[prc, k, t]$: coût fixe de construction d'une nouvelle technologie prc au début de la période t , dans le $k^{ième}$ segment de l'approximation linéaire;

$fix_aug[prc, k, t]$: coût fixe d'augmentation de capacité d'une technologie prc au début de la période t , dans le $k^{ième}$ segment de l'approximation linéaire;

$var_cons[prc, k, t]$: coût variable de construction d'une nouvelle technologie prc au début de la période t , dans le $k^{ième}$ segment de l'approximation linéaire;

$var_aug[prc, k, t]$: coût variable d'augmentation de capacité d'une technologie prc au début de la période t , dans le $k^{ième}$ segment de l'approximation linéaire.

$$\begin{aligned}
OPER_a(t) = & \sum_{s \in (S \setminus S_{-ext})} \sum_{c \in Comb[s]} \left(varom_{sv}[c, s, t] * Q_{sv}(c, s, t) \right. \\
& \left. + \sum_{(col \in Col[c])} varom_{cs}[col, c, s, t] * Q_{cs}(col, s, t) \right) \\
& + \sum_{s \in S_{-ext}} \left[\sum_{col \in Col} \sum_{d \in Site} varom_{ext}[col, s, t] * \left(\begin{array}{c} F_{csu}(col, s, d, t) \\ + F_{csd}(col, s, d, t) \end{array} \right) \right. \\
& \left. + \sum_{c \in Comb[s]} \sum_{d \in Site} varom_{ext}[sac_v, s, t] * \left(\begin{array}{c} F_{svd}(c, s, d, t) \\ + F_{svu}(c, s, d, t) \\ + F_{svt}(c, s, d, t) \\ + F_{sve}(c, s, d, t) \end{array} \right) \right] \\
& + \sum_{s \in S} \sum_{col \in Col} \sum_{d \in Site} dist[s, d] * varom_{tr}[col, t] * \left(\begin{array}{c} F_{csu}(col, s, d, t) \\ + F_{csd}(col, s, d, t) \end{array} \right) \\
& + varom_{tr}[sac_v, t] * \sum_{s \in S} \sum_{c \in Comb} \sum_{d \in Site} dist[s, d] * \left(\begin{array}{c} F_{svd}(c, s, d, t) \\ + F_{svu}(c, s, d, t) \\ + F_{svt}(c, s, d, t) \\ + F_{sve}(c, s, d, t) \end{array} \right) \\
& + \sum_{o \in Site} \sum_{v \in V} \sum_{mat \in Mat[v]} \sum_{d \in Site} dist[o, d] * varom_{tr}[v, t] * \left(\begin{array}{c} F_{ii}(mat, o, d, t) \\ + F_{ie}(mat, o, d, t) \end{array} \right) \\
& + \sum_{site \in Site} \sum_{pr \in Prc} \sum_{mod \in Mod[pr]} \left(\begin{array}{c} varom_{pr}[pr, t] + \\ varom_{op}[mod, pr] \end{array} \right) * ACT(mod, pr, site, t) \\
& + \sum_{site \in Site} \sum_{prc \in Prc} fixom[prc, t] * CAP(site, prc, t);
\end{aligned}$$

où,

$fixom[prc, t]$: coût annuel de maintenance d'une unité de capacité de la technologie prc à la période t ;

- $varom_pr[prc, t]$: coût unitaire global d'opération de la technologie prc , pendant la période t . Ce coût ne varie pas selon les modes opératoires ;
- $varom_op[mod, prc, t]$: coût unitaire d'opération associé au mode opératoire mod , pour la technologie prc pendant la période t ;
- $varom_sv[c, s, t]$: coût unitaire de la collecte régulière résiduelle de la combinaison c à la source s , pendant la période t ;
- $varom_cs[col, c, s, t]$: coût unitaire de la collecte sélective col lorsque la combinaison c est choisie à la source s , pendant la période t ;
- $varom_ext[col, s, t]$: coût unitaire de collecte associé à la collecte col à la source externe s , pendant la période t ;
- $varom_tr[trn, t]$: coût unitaire de transport associé au mode de collecte ou au type de véhicule trn pendant la période t .

Le volume total enfoui

Comme décrit dans la contrainte (3.41), le volume total enfoui est donné par l'expression :

$$\sum_{t \in T} \sum_{site \in Site} \sum_{enf \in Enf} app * ACT(enf, enf, site, t). \quad (3.43)$$

CHAPITRE 4

Structure du modèle et méthode de résolution

Le modèle Eugène est un modèle de programmation linéaire mixte de grande taille. Il contient près de 2000 variables binaires pour un scénario réaliste d'une grande ville sur un horizon de 20 ans. Ce chapitre vise à déterminer une approche de résolution efficace pour ce problème. La première section présente brièvement la structure mathématique du modèle en insistant sur les composantes discrètes de ce dernier. L'approche de résolution basée sur la méthode de "*séparation et d'évaluation*" est présentée à la section 2. La section 3 présente un ensemble de résultats comparatifs obtenus à l'aide du logiciel CPLEX 5.0 [14]. Enfin, la section 4 présente un ensemble de coupes de réalisabilité qui permet une réduction significative du temps de résolution.

4.1 Structure du modèle

Dans cette section nous parlons brièvement du modèle Eugène décrit en détail au chapitre précédent. Les problèmes linéaires mixtes 0-1, tels que Eugène peuvent être représentés comme suit :

$$MIP \left\{ \begin{array}{l} \min \quad z = \sum_{j \in I} c_j x_j + \sum_{j \in (N \setminus I)} c_j x_j \\ \text{sujet à} \quad \sum_{j \in I} a_{ij} x_j + \sum_{j \in (N \setminus I)} a_{ij} x_j \leq b_i, \quad \forall i \in Cont \\ \\ l_j \leq x_j \leq u_j, \quad \forall j \in N \setminus I \\ \\ x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in I \end{array} \right.$$

où I désigne l'ensemble des variables binaires, $N \setminus I$ est l'ensemble des variables continues et $Cont$ est l'ensemble des contraintes. Les valeurs l_j sont les bornes inférieures et u_j sont les bornes supérieures sur les variables.

Le modèle Eugène contient des variables binaires et des variables continues. Les contraintes du modèle peuvent contenir exclusivement des variables continues ou des variables binaires. Certaines contraintes que nous appelons "*mixtes*" contiennent à la fois des variables continues et des variables binaires.

Les variables entières sont dénotées par $EX_co(c, s, t)$, $EX_pr(site, prc, t)$, $D_cons(site, prc, k, t)$ et $D_aug(site, prc, k, t)$. Nous distinguons 4 classes de contraintes : les contraintes continues, les contraintes mixtes, les contraintes binaires et les contraintes de borne.

- Les *contraintes continues* sont numérotés (3.4 à 3.29) et (3.38 à 3.41). Elles ne font pas intervenir les variables binaires.
- Les *contraintes mixtes* portent les numéros (3.2, 3.3, 3.30, 3.31, 3.34, 3.35, 3.36 et 3.42). Elles font intervenir à la fois les variables binaires et les variables continues. Les contraintes (3.2, 3.3, 3.30, 3.31, 3.34 et 3.35) sont appelées contraintes du "*Grand_M*". Elles servent à borner les variables continues $Q_{cs}(col, s, t)$, $Q_{sv}(c, s, t)$, $CAP(site, prc, t)$, $INV_c(site, prc, k, t)$ et $INV_a(site, prc, k, t)$, en utilisant les variables binaires $EX_co(c, s, t)$, $EX_pr(site, prc, t)$, $D_cons(site, prc, k, t)$ et $D_aug(site, prc, k, t)$. Les contraintes (3.36) sont appelées "*contraintes de superficie*". Elles font intervenir les variables continues $CAP(site, prc, t)$ et les variables binaires

$EX_{pr}(site, prc, t)$. Les contraintes (3.42) limitent la somme des impacts environnementaux des technologies utilisées. Elles font intervenir les variables d'existence et les variables d'activité.

- Les contraintes binaires sont numérotées (3.1, 3.32, 3.33 et 3.37). Elles ne concernent que les variables binaires. Les contraintes (3.32) et (3.33) permettent de borner les variables $D_{cons}(site, prc, k, t)$ et $D_{aug}(site, prc, k, t)$ à partir des variables $EX_{pr}(site, prc, t)$. Les contraintes (3.1) et (3.37) découlent de deux hypothèses de départ du modèle : le choix d'une combinaison à la fois à chaque source et la non-coexistence des technologies aux sites.
- Les contraintes de borne : certaines bornes ne sont pas mentionnées explicitement. Les variables continues sont des réels positifs et les variables binaires sont des éléments de l'ensemble $\{0, 1\}$.

4.2 Méthode de résolution : séparation et évaluation

La principale approche de résolution pour les programmes linéaires mixtes est la méthode de séparation et d'évaluation progressive [33, 47]. Le principe général de cette méthode est de ne pas s'attaquer directement au problème mixte MIP , mais de résoudre d'abord le problème continu LP obtenu en supprimant les restrictions d'intégrité sur les variables binaires. Ce problème est appelé la "relaxation initiale". Ainsi, on remarque que le domaine réalisable de MIP est un sous-ensemble du domaine réalisable de LP . Comme l'explique Taha [46], deux opérations guident la méthode de séparation et évaluation.

1. "*Séparation*" : le domaine continu est partitionné en sous-domaines qui sont aussi continus. Le but du partitionnement est d'éliminer des solutions qui sont réalisables pour LP mais qui ne sont pas réalisables pour MIP . Dans notre cas, une variable binaire ayant une valeur fractionnaire permet d'obtenir deux sous-problèmes en fixant cette variable à 0 ou à 1.
2. "*Évaluation*" : la valeur optimale de la relaxation linéaire constitue une borne

inférieure du problème *MIP*.

Chaque sous-problème créé est résolu comme la relaxation initiale. Si la solution d'un problème linéaire est réalisable pour *MIP*, il n'est pas subdivisé; autrement, il doit être subdivisé. La solution optimale est obtenue lorsque la meilleure borne inférieure correspond à une solution réalisable pour *MIP*.

Un arbre est utilisé pour illustrer l'ensemble de problèmes linéaires générés. Chaque noeud représente un sous-problème et chaque branche représente la contrainte ajoutée.

4.2.1 Algorithme

Nous allons décrire brièvement l'algorithme de Land et Doing présenté par Linderoth et Savelsbergh [33]. Les notations suivantes sont utilisées :

L : ensemble des sous-problèmes actifs ;

z_U : la borne supérieure sur la valeur optimale de *MIP* ;

z_{LP}^i : la valeur optimale du problème linéaire i ;

z_L^j : la borne inférieure sur la valeur optimale du sous-problème j ;

x^* : la meilleur solution réalisable.

L'algorithme comprend 6 étapes :

Etape 1 : Initialisation

$L = \{\text{relaxation initiale}\}$, $z_U = \infty$, $x^* = \emptyset$.

Etape 2 : Test d'optimalité

Si $L = \emptyset$, x^* est la solution optimale.

Etape 3

Choisir un sous-problème i et l'éliminer de la liste L .

Etape 4

Résoudre la relaxation linéaire de i . Si elle n'est pas réalisable aller à l'étape 2. Sinon, poser z_{LP}^i et x^i la valeur et la solution optimales obtenues.

Etape 5

Si $z_{LP}^i \geq z_U$, aller à l'étape 2. Si x^i n'est pas réalisable pour MIP aller à l'étape 6. Sinon $z_U = z_{LP}^i$, $x^* = x^i$. Élimine de L tous les sous-problèmes j tels que $z_L^j \geq z_U$ et aller à l'étape 2.

Etape 6

Choisir une variable binaire ayant une valeur fractionnaire dans la solution x^i et subdiviser le problème i à partir de cette variable.

Pour que l'algorithme soit complètement défini, on doit fixer à l'étape 3, la sélection du sous-problème à résoudre et à l'étape 6, la règle de séparation du noeud courant. Ces deux règles (choix de noeuds et choix de variables) sont cruciales quant à l'efficacité de l'approche de séparation et d'évaluation progressive.

Règle de sélection et de séparation

1. Règle de séparation

Lorsqu'un noeud est choisi pour être subdivisé, il est important de bien choisir

la variable à partir de laquelle la division sera faite. Quatre critères de choix de variables sont considérés : “*variable la plus fractionnaire*”, “*variable la moins fractionnaire*”, “*pseudo couts-réduits*” et “*branchement efficace*”.

Par le critère de la “*variable la moins fractionnaire*”, la variable la plus proche d’une des bornes est choisie. Par le critère de la “*variable la plus fractionnaire*”, la variable la plus éloignée des deux bornes est choisie. Le critère des “*pseudo couts-réduits*” est basé sur l’estimation, pour chaque variable fractionnaire du changement sur la valeur optimale si la variable est fixée à 0 ou à 1. Le critère de “*branchement efficace*” consiste à résoudre partiellement chaque sous-problème obtenu en fixant une variable fractionnaire et à choisir la direction la plus prometteuse.

2. Règles de sélection

Le choix des noeuds est guidé par le souci d’obtenir une meilleure solution réalisable ou de démontrer que la solution réalisable courante est optimale. On dispose des méthodes de recherche “*profondeur d’abord*”, “*meilleur d’abord*” ou “*meilleure estimation*”.

La recherche “*profondeur d’abord*”, comme son nom l’indique, consiste à aller au fond de chaque branche commencée. La recherche “*meilleur d’abord*” consiste en un choix du noeud correspondant à la meilleure borne inférieure. La méthode de recherche “*meilleure estimation*” consiste à prédire la meilleure valeur pouvant être obtenue à partir des fils de chaque noeud. On peut aussi alterner les méthodes de recherche *meilleure estimation* et *meilleurs d’abord*.

4.3 Résultats comparatifs

Nous analysons dans cette section l’effet des différentes règles de sélection et de séparation ainsi que les approches possibles de résolution des programmes linéaires relaxés. Nous utilisons le logiciel commercial *CPLEX 5.0* sur une station Sun Ultra de 200mhz pour résoudre le modèle Eugène. Ce logiciel est actuellement un des plus efficaces sur le marché et offre un lien avec le générateur de modèle utilisé *AMPL-PLUS*. Nous utilisons 2 problèmes tests issus de la base de données développée au *GERAD*

[3, 34, 41, 40]. Le premier, *problème_5ans* désigne le problème de planification pour une période de 5 ans. Le second *problème_10ans* désigne le problème de planification pour deux périodes de 5 ans. Le tableau 4.1 donne le nombre de variables et le nombre de contraintes de chacun des deux problèmes.

TAB. 4.1 – Problèmes tests

	<i>variables</i>	<i>variables binaires</i>	<i>contraintes</i>
<i>problème_5ans</i>	14152	516	3833
<i>problème_10ans</i>	28207	955	7569

Des tests effectués sur ces deux problèmes nous ont permis d'établir une règle de subdivision et de choix des algorithmes de résolution de problèmes linéaires, suivant la spécificité de notre modèle.

4.3.1 Choix des noeuds et choix des variables

Quatre méthodes de choix de noeuds sont proposées : “*profondeur d'abord*”, “*meilleur d'abord*”, “*meilleure estimation*” et “*alternances des méthodes meilleur d'abord et meilleure estimation*”. Cinq critères de choix de variables sont disponibles : “*variable la plus fractionnaire*”, “*choix automatique par le logiciel CPLEX*”, “*variable la moins fractionnaire*”, “*pseudo coûts réduits*” et “*branchement efficace*”. Dans le tableau 4.2, des temps de résolution du *problème_5ans* sont rassemblés pour toutes les combinaisons de méthodes de choix de noeuds et de critères de choix de variables. Les colonnes du tableau 4.2 représentent les méthodes de choix de noeuds tandis que les lignes représentent les critères de choix de variables. Nous constatons que les critères de choix de variables “*choix automatique*”, “*pseudo coûts réduits*” et “*branchement efficace*” conduisent aux meilleurs temps de résolution.

Dans le tableau 4.3, les temps de résolution du *problème_10ans* sont analysés à partir des combinaisons entre les critères de choix de variables “*choix automatique*”, “*pseudo coûts réduits*” et “*branchement efficace*” et les quatre critères de choix de noeuds. Nous constatons que la combinaison des critères “*alternances des méthodes*

TAB. 4.2 – Comparaison des règles de sélection et de séparation

	<i>profondeur</i>	<i>meilleur</i>	<i>meil. esti.</i>	<i>alt.</i>
moins fractionnaire (en sec.)	867.20	367.52	634.02	290.60
sél. automatique (en sec.)	14.75	24.74	21.14	20.95
plus fractionnaire (en sec.)	1969.40	144.46	96.56	98.33
pseudo coûts réduits (en sec.)	15.43	24.15	21.36	21.45
branchement efficace (en sec.)	24.66	23.42	24.76	23.85

meilleur d'abord et meilleure estimation" pour le choix des noeuds et "*branchement efficace*" pour le choix des variables, offre le meilleur temps de résolution pour le *problème_10ans*. Cette combinaison est choisie pour tous les tests qui suivent.

TAB. 4.3 – Temps de résolution du *problème_10ans*

	<i>profondeur</i>	<i>meilleur</i>	<i>meil. esti.</i>	<i>alt.</i>
sél. automatique (en sec.)	26775.29	20318.66	8653.04	29119.48
coûts réduits (en sec.)	26382.14	20720.43	8666.66	27780.53
branchement efficace (en sec.)	655.04	657.46	659.74	636.11

4.3.2 Résolution des problèmes linéaires : relaxation initiale et des sous-problèmes

Six méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des problèmes linéaires : "*simplexe primal*", "*simplexe dual*", "*simplexe de réseau*", "*barrières et croisement*", "*simplexe dual et barrières*" et "*barrières sans croisement*". Dans le tableau 4.4, les temps de résolution du *problème_5ans* sont présentés, pour toutes les combinaisons de méthodes pour la résolution de la relaxation initiale et la résolution des sous-problèmes. Les colonnes du tableau 4.4 représentent les méthodes utilisées pour résoudre la relaxation initiale tandis que les lignes représentent les méthodes utilisées pour la résolution des sous-problèmes.

TAB. 4.4 – Comparaison des méthodes de résolution des problèmes relaxés

	<i>pri</i>	<i>dual</i>	<i>réseau</i>	<i>bar/crois</i>	<i>dual/bar</i>	<i>bar</i>
pri (en sec.)	36.60	41.96	37.49	39.72	42.57	39.56
dual (en sec.)	23.85	26.23	32.15	27.07	26.62	32.93
réseau (en sec.)	267.18	290.75	290.90	277.40	296.47	138.41
bar/crois (en sec.)	280.85	285.44	285.49	293.76	298.83	154.16
dual/bar (en sec.)	25.41	28.84	31.81	27.78	28.86	34.61
bar (en sec.)	307.46	324.75	309.31	315.25	310.24	161.68

Nous constatons que les meilleurs temps sont obtenus lorsqu'on utilise à la fois la méthode "*simplexe primal*" pour résoudre la relaxation initiale et la méthode "*simplexe dual*" ou la méthode "*simplexe dual et barrières*" pour résoudre les sous-problèmes. Le tableau 4.5 donne la comparaison des temps de résolution du *problème_10ans*, en utilisant ces méthodes. Le résultat de l'analyse nous permet de choisir la méthode "*simplexe primal*" pour la résolution de la première relaxation et la méthode "*simplexe dual*" sera choisi pour la résolution des sous-problèmes.

TAB. 4.5 – Choix de méthodes de résolution du sous-problème

	<i>pri</i>
<i>dual</i>	636.11 sec.
<i>dual/bar</i>	750.79 sec

4.4 Coupes et paramètres de priorité

Dans cette section, nous allons définir les coupes d'optimalité et expliquer le choix des paramètres de priorité qui nous permettent d'améliorer le temps de résolution de notre problème. Les coupes servent à réduire les ensembles réalisables des sous-problèmes relaxés, en s'assurant que la partie éliminée ne contiendra pas la solution optimale du problème *MIP*. Les paramètres de priorité interviennent dans l'algorithme de séparation et évaluation. Les variables qui ont une plus grande valeur

sont sélectionnées de façon prioritaire.

4.4.1 Les coupes

Nous constatons que lorsque les contraintes d'intégrités sont violées, il peut arriver des situations, où on ait l'inégalité suivante :

$$EX_{pr}(site, prc, t) > D_{cons}(site, prc, k, t) + EX_{pr}(site, prc, t - 1).$$

Ceci voudrait dire qu'une technologie peut exister à une période donnée sans avoir été construite et sans avoir existé auparavant ; ce qui n'est pas possible. Comme le montre la proposition suivante, pour toute solution réalisable, la condition nécessaire pour qu'une technologie existe à la période t sans avoir existé à la période $t - 1$ c'est qu'elle soit introduite au début de la période t .

Proposition 4.1 *Pour toute solution réalisable, les inégalités suivantes sont vérifiées :*

$$\begin{aligned} EX_{pr}(site, pr, t) &\leq \sum_{k \in K_{cons}[pr]} D_{cons}(site, pr, k, t) + EX_{pr}(site, pr, t - 1), \\ \forall site \in Site, \quad \forall pr \in Prc, \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (4.1)$$

Preuve : Remarquons d'abord que dans une solution réalisable, les valeurs possibles pour les variables binaires sont 0 et 1.

Montrons que pour toute solution réalisable,

$$\begin{cases} EX_{pr}(site, pr, t) = 1, \\ EX_{pr}(site, pr, t - 1) = 0 \end{cases} \Rightarrow \sum_{k \in K_{cons}[pr]} D_{cons}(site, pr, k, t) = 1,$$

$$(\forall site \in Site, \quad \forall pr \in Prc, \quad \forall t \in T).$$

En effet, si $EX_{pr}(site, prc, t-1) = 0$ alors,

la contrainte (3.33) donne $\sum_{k \in K_{aug}[prc]} D_{aug}(site, prc, k, t) = 0$. D'où,

$$\begin{aligned} D_{aug}(site, prc, k, t) &= 0, \quad \forall k \in K_{aug} \text{ et la contrainte (3.34) donne :} \\ INV_a(site, prc, k, t) &= 0, \quad \forall k \in K_{aug}[prc] \end{aligned} \quad (4.2)$$

D'autre part les contraintes (3.30) donnent : $CAP(site, prc, t-1) = 0$ et d'après (3.29) on conclut que

$$\sum_{\tau > t-1-vie(prc)}^{t-1} \sum_{k \in K_{cons}[prc]} INV_c(site, prc, k, \tau) = 0, \quad (4.3)$$

$$\sum_{\tau > t-1-vie(prc)}^{t-1} \sum_{k \in K_{aug}[prc]} INV_a(site, prc, k, \tau) = 0, \quad (4.4)$$

$$\text{et } resid[site, prc, t-1] = 0. \text{ Donc, forcément, } resid[site, prc, t] = 0. \quad (4.5)$$

Il résulte des contraintes (3.29) et des égalités (4.2) à (4.5) que :

$$CAP(site, prc, t) = \sum_{k \in K_{cons}[prc]} INV_c(site, prc, k, t). \quad (4.6)$$

D'un autre coté, si $EX_{pr}(site, prc, t) = 1$,

alors la contrainte (3.31) implique l'inégalité

$$CAP(site, prc, t) \geq 0. \quad (4.7)$$

Des inégalités (4.6) et (4.7), on déduit l'inégalité

$\sum_{k \in K_{cons}[prc]} INV_c(site, prc, k, t) \geq 0$ qui, combinée aux contraintes (3.35) et (3.32), nous permet de conclure que $\sum_{k \in K_{cons}[prc]} D_{cons}(site, prc, k, t) = 1$.

D'où le résultat. ■

Dans la suite, l'expression "*coupe 1*" fera référence aux inégalités (4.1). Lorsqu'elle est ajoutée au modèle, la "*coupe 1*" permet d'améliorer le temps de résolution. D'autres contraintes logiques n'apparaissent pas de façon explicite dans le modèle, mais sont vérifiées par toute solution optimale. Celles que nous retenons signifient que lorsqu'une technologie est introduite, alors elle existe jusqu'à la fin de sa durée de vie. Dans la proposition suivante, nous montrons que cette propriété est vraie pour toute solution optimale.

Proposition 4.2 *Pour toute solution optimale les inégalités suivantes sont vérifiées :*

$$\sum_{k \in K_cons[prc]} D_cons(site, prc, k, \tau) - EX_pr(site, prc, t) \leq 0. \quad (4.8)$$

$$(\forall site \in Site, \quad \forall prc \in Prc, \quad \forall \tau \in T \cap [t - vie(prc), t])$$

Preuve : Montrons que pour une solution optimale,

$$EX_pr(site, prc, t) = 0 \Rightarrow \sum_{k \in K_cons[prc]} D_cons(site, prc, k, \tau) = 0$$

$$\forall \tau : t - vie[prc] < \tau \leq t$$

En effet, si $EX_pr(site, prc, t) = 0$,

alors les contraintes (3.30) implique que $CAP(site, prc, t) = 0$ et d'après les contraintes (3.29) nous concluons que $\sum_{\tau > t - vie(prc)} \sum_{k \in K_cons[prc]} INV_c(site, prc, k, \tau) = 0$.

D'autre part, si pour une solution réalisable il existe $(\tau \in [max(1, t - vie[prc] + 1), t])$ tel que $D_cons(site, prc, k, \tau) = 1$, comme $\sum_{k \in K_cons[prc]} INV_c(site, prc, k, \tau) = 0$, cette solution n'est pas optimale car le coefficient de $D_cons(site, prc, k, \tau)$ étant positif dans l'objectif, on peut avoir une autre meilleure solution réalisable :

il suffit de poser $D_cons(site, prc, k, \tau) = 0$.

Donc, $D_cons(site, prc, k, \tau) = 0 \quad \forall \tau : t - vie[prc] < \tau \leq t$, d'où le résultat. ■

Dans la suite, l'expression "*coupe 2*" fera référence aux inégalités (4.8). Comme le montre les résultats rassemblés dans le tableau 4.6, ces nouvelles contraintes permettent de réduire le temps de résolution.

Nous utilisons six problèmes test, de planification sur deux périodes de 5 ans, pour analyser l'utilité de l'ajout de la "coupe 1" et de la "coupe 2" au modèle. Ces problèmes sont notés : *base*, *fer0*, *pla0*, *alu0*, *vert* et *elec14*.

1. Le scénario de base consiste à l'utilisation des données bruts de la ville de Montréal décrits au chapitre 4. Le problème *base* coïncide avec le problème_10ans déjà utilisé.
2. Le problème *fer0* consiste à remplacer le prix du fer, qui est de 68.89 dollars dans le scénario de base, par 0 dollars.
3. Le problème *pla0* consiste à remplacer le prix des plastiques, qui est de 233.87 dollars pour le *polyéthylène téréphtalate (pet)* et de 421.14 dollars pour le *polyéthylène haute densité (pehd)* dans le scénario de base, par 0 dollars.
4. Le problème *alu0* consiste à remplacer le prix de l'aluminium, qui est de 1252.95 dollars dans le scénario de base, par 0 dollars.
5. Le problème *vert* consiste à remplacer, dans le scénario de base, les coûts des combinaisons ne contenant pas la collecte de matières organiques par 150 dollars.
6. Le problème *elec14* consiste à remplacer le prix de l'électricité, qui est de 0.023 dollars dans le scénario de base, par 0.14 dollars.

Les tests portent sur trois modèles :

1. *MO* : le modèle original ;
2. *Coupe1* : le modèle original auquel on ajoute la "coupe 1" ;
3. *Coupe2* : le modèle original auquel on ajoute la "coupe 2" ;
4. *Coupe12* : le modèle original auquel on ajoute la "coupe 1" et la "coupe 2".

Les problèmes *pla0* et *alu0* sont parmi les plus difficiles à résoudre. D'une part, la différence entre les prix des matières recyclables et les coûts (collectes sélectives et tri) est négative. D'autre part, la solution optimale tient compte d'une capacité existante d'un centre de tri. Ainsi, beaucoup de possibilités d'investissement doivent être examinées. De plus, à toutes les sources, les choix de combinaison de collectes doivent être coordonnés pour permettre l'utilisation maximale de la capacité existante du centre de tri. Nous remarquons qu'en ajoutant à la fois la "coupe 1" et la coupe "coupe 2", on réduit de plus de la moitié le temps de résolution. Dans la suite, la "coupe 1" et "coupe 2" sont maintenues dans le modèle.

TAB. 4.6 – Évaluation des coupes

	<i>MO (en sec.)</i>	<i>Coupe1 (en sec.)</i>	<i>Coupe2 (en sec.)</i>	<i>Coupe12 (en sec.)</i>
base	636.11	219.03	661.82	213.22
fer0	553.69	519.79	413.88	292.89
vert	757.38	345.81	518.44	250.49
pla0	2196.67	364.73	1792.69	378.64
alu0	7817.09	2166.31	2374.36	1983.29
elec14	1859.21	614.77	1424.09	591.91

4.4.2 Paramètres de priorités sur les variables binaires

Les paramètres de priorités sur les variables permettent d'orienter le choix des variables de séparation. La variable correspondant à un paramètre de priorité élevée est choisie avant la variable correspondant à un paramètre de priorité moins élevée. La valeur par défaut des paramètres de priorité est 0.

Les variables binaires sont de la forme $EX_{pr}(site, prc, t)$, $D_{cons}(site, prc, k, t)$, $D_{aug}(site, prc, k, t)$ et $EX_{co}(c, s, t)$. Nous les appelons respectivement *variables d'existence*, *décision de construire*, *décision d'augmenter* et *variables de choix de combinaison*. Les variables d'existence ainsi que les décisions de construire et d'augmenter portent également un nom commun : *variables de localisation*.

Deux critères ont été choisis afin d'établir l'ordre de priorité sur les variables binaires : les *coûts qui leur sont associés* et le *caractère dynamique du modèle*. Plus précisément :

1. Du point de vue économique, les coûts liés aux variables de localisation sont importants et ne sont pas comparables aux coûts reliés aux choix de combinaison.
2. Du point de vue dynamique, les contraintes (3.32) et (3.33) montrent que les décisions prises pendant la période $t - 1$ peuvent influencer les décisions prises pendant la période t .

Nous utilisons à nouveau les problèmes test définis ci-haut : *base*, *fer0*, *pla0*, *alu0*, *vert* et *elec14*. En utilisant le modèle " Coup12" défini si haut, le tableau 4.4.2 nous permet de comparer les temps de résolution pour trois cas :

- *loc* : si la priorité de toutes les variables de *localisation* est égale à 1 ;
- *loc, per* : si la priorité sur les variables de *localisation* est 2 pour la *période 1* et 1 pour la *période 2* ;
- *loc, comb, per* : si la priorité sur les variables de *localisation* est 3 pour la *période 1* et 2 pour la *période 2* et que pour les variables de choix de *combinaison*, la priorité est 1 pour la *période 1*.

TAB. 4.7 – Évaluation des paramètres de priorité

	<i>loc</i> (en sec.)	<i>loc, per</i> (en sec.)	<i>loc, com, per</i> (en sec.)
base	207.22	875.78	881.04
fer0	298.66	1137.18	1136.94
vert	276.53	1877.00	1852.37
pla0	358.59	619.15	614.24
alu0	1152.56	971.60	953.21
elec14	577.14	12201.25	12509.81

En comparant les résultats des tableaux 4.6 et 4.4.2, on remarque que favoriser les variables de localisation par rapport aux variables de choix de combinaison nous permet d'améliorer le temps de résolution. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsqu'on donne la même valeur à toutes les variables de localisation.

4.4.3 La marge d'erreur

Dans la méthode de séparation et évaluation, chaque solution réalisable pour "MIP" permet de mettre à jour la borne supérieure Z_U . Par ailleurs, tous les noeuds dont la valeur optimale de la relaxation linéaire dépasse la borne supérieure ne sont pas subdivisés puisqu'ils sont dominés (i.e. ne permettent pas d'améliorer la solution courante).

Le paramètre "différence entre objectifs" permet de fixer des bornes supérieures

$z_U - d$ plus petites que la borne supérieure z_U venant des solutions réalisables. On accepte ainsi une marge d'erreur d qui est une borne sur la différence entre la valeur optimale escomptée et la valeur optimale réelle. La "différence relative" est donnée par le rapport $\frac{d}{z_U}$ (si z_U a une valeur non nulle).

Nous utilisons le modèle "Coupe12" en portant à 1 la valeur du paramètre de priorité de toutes les variables de localisation. Nous tentons de résoudre le problème de planification pour 4 périodes de la gestion intégrée de déchets dans la ville de Montréal. Deux autres scénarios sont ajoutés aux problèmes tests. Le scénario "*minenf*" consiste à remplacer l'objectif qui minimise les coûts par une minimisation de la somme des activités des sites d'enfouissement. Dans le scénario "*enfcont*", nous gardons l'objectif de minimisation des coûts et nous ajoutons la contrainte qui limite la somme des activités des sites d'enfouissement par la valeur optimale obtenue au scénario "*minenf*". Le problème *enfcont* est le plus difficile à résoudre car la contrainte sur l'enfouissement total à tous les sites et à toutes les périodes met en relation la majorité des variables et des contraintes du problème.

Le tableau 4.8 montre les améliorations dans le temps de résolution lorsque la différence relative est fixée à 0.0007. La valeur par défaut de cette différence relative étant 0.

TAB. 4.8 – Évaluation du temps, acceptant une marge d'erreur

	<i>diff rel = 0</i>	<i>dif rel = 0.0007</i>
base	5847.55	4339.67
fer0	9408.76	8741.31
vert	4971.28	2703.53
pla0	15837.53	6896.56
alu0	59299.35	5490.17
elec14	13265.56	10991.04
minenf	940.42	2227.92
enfcont	45302.96	12407.65

Nous constatons que lorsque le paramètre “différence relative” est nul, la résolution du problème de planification sur quatre périodes peut durer jusqu’à 16h. Lorsque ce paramètre est fixé à 0.0007, le temps de résolution ne dépasse pas 3h30. Choisir une différence relative de 0.0007 revient à accepter une marge d’erreur de 0.7 sur 1000. Cette marge est tout à fait acceptable pour les modèles techno-économiques de ce type.

4.4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous décrivons en grandes lignes le modèle de *gestion intégrée* de déchets défini au Chapitre 3. Nous présentons ensuite l’algorithme de *Land et Doig* pour les *méthodes de séparation et d’évaluation*. A partir des tests effectués sur le problème de gestion de déchets dans la ville de Montréal, nous élaborons une stratégie de branchement et de résolution des problèmes linéaires offrant un meilleur temps de résolution. Après l’analyse de la relaxation, nous extrayons deux propriétés vérifiées par la solution optimale mais qui ne subsistent pas lorsque les contraintes d’intégrité sont relaxées. Ces propriétés jouent un rôle important dans le sens où, une fois qu’elles sont ajoutées au modèle, définissant ainsi de nouvelles contraintes, le temps de résolution est considérablement réduit. La définition des paramètres de priorité, sur base d’importance des variables binaires nous permet également de réduire le temps de résolution. Enfin, nous constatons que, acceptant une marge d’erreur de 0.7 sur 1000, on obtient un temps raisonnable de résolution ne dépassant pas 3h30, pour les problèmes de planification sur quatre périodes.

CHAPITRE 5

Application du modèle : analyse des stratégies permettant de réduire l'enfouissement sur le territoire de la ville de Montréal

Dans ce chapitre, nous analysons à l'aide du modèle *Eugène* différents scénarios de la gestion de déchets sur le territoire de la ville de Montréal. Ces analyses permettront dans un premier temps de valider le modèle développé. Dans un deuxième temps, ils fourniront aux gestionnaires municipaux, un ensemble exhaustif de résultats obtenus pour la première fois à l'aide d'un modèle prospectif très complet.

Ce chapitre est organisé en trois sections dont la première décrit brièvement la base de données actuelle du modèle. La section 2 décrit les quatre scénarios étudiés. Les résultats et la conclusion sont présentés à la section 3.

5.1 La base de données

La base de données actuelle du modèle *Eugène* est le résultat de trois années de recherches effectuées au GERAD dans le cadre d'une subvention stratégique de recherche CRSNG (Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et Génie du Canada). Cette section présente une synthèse des principales composantes de cette base de données regroupées selon six items : les sources, les sites, les technologies de traitement,

les modes de collecte, les marchés et les indices environnementaux.

L'essentiel de cette section est issu des travaux de recherches de Soucy [41], Live [34], Ratel [40], Ben Abdalha [3] et Vaillancourt [48]. Nous ne rappelons pas, ici, les multiples références qui ont mené aux données retenues. Le lecteur intéressé peut consulter les mémoires précités.

5.1.1 Les sources

Comme sources non externes que nous appelons simplement "sources", nous considérons les neuf arrondissements de la Ville de Montréal. Les sources externes considérées sont la station d'épuration des eaux usées ainsi qu'une source fictive de bran de scie. Les boues d'épuration et le bran de scie sont utilisés dans des technologies de compostage. L'effort a été mis sur la construction d'une base de données pour la modélisation des déchets résidentiels non encombrants et non dangereux du territoire de la ville de Montréal. Le tableau 5.1 indique la localité et la quantité annuelle de déchets générés aux différentes sources.

TAB. 5.1 – Génération

<i>source</i>	<i>localisation</i>	<i>quantité</i>
<i>arr₁</i>	Ahuntsic, Cartierville	42,856 t/an
<i>arr₂</i>	Villeray, St-Michel, Parc-Extension	46,033 t/an
<i>arr₃</i>	Rosemont, Petite-Patrie	51,919 t/an
<i>arr₄</i>	Mercier, Hochelaga, Maisonneuve	46,163 t/an
<i>arr₅</i>	Plateau Mont-Royal, Centre-Sud	49,365 t/an
<i>arr₆</i>	Ville-Marie	22,234 t/an
<i>arr₇</i>	Côtes-des-Neiges, Notre-Dame-de-Grâce	57,549 t/an
<i>arr₈</i>	Sud-ouest	22,647 t/an
<i>arr₉</i>	Rivière-des-prairies, Pointe-aux-Trembles	27,134 t/an

Ces quantités sont issues du rapport [50] de la ville de Montréal. Compte tenu

d'une population stable et d'un manque d'informations quant à l'évolution des comportements des ménages, nous supposons que les quantités et les compositions des déchets résidentiels sont invariantes suivant les périodes. Nous estimons à 69,000 tonnes et 100,000 tonnes respectivement la quantité de boues et la quantité de bran de scie produits annuellement aux sources externes.

D'après le rapport du GRAIGE de 1989 [25], il n'y a pas de caractérisation assez précise qui puisse nous permettre de distinguer la composition des déchets issus des différents arrondissements. En comparant plusieurs sources d'informations, Soucy [41] a obtenu la composition détaillée du sac d'ordures ménagères moyen de la ville de Montréal. Ces informations sont présentées dans le tableau 5.2 subdivisé en quatre colonnes. La première colonne indique la proportion (*prop.*) de chaque matière par unité de déchets domestiques produits. Dans les autres colonnes, nous retrouvons les propriétés des matières qui jouent un rôle non négligeable dans le choix des méthodes de traitement. Les colonnes 2 et 3 donnent respectivement la teneur en cendre et la valeur calorifique (*PC*) des matières telles que données par Tchobanoglous [47]. La colonne 4 indique si la matière est recyclable (*r*) ou compostable (*c*). Les matières compostables ont été identifiées par Ratel [40] et les matières recyclables sont celles qui ont actuellement une valeur sur le marché. Les matières non compostables et non recyclables sont regroupées sous le nom *autre*.

Les matières recyclables peuvent être regroupées sous les noms couramment utilisés pour désigner ces matières : papier, carton, contenants. Les matières compostables et non recyclables sont couramment appelées *matières organiques*. Elles peuvent être classées en deux catégories : les résidus de cuisines et les résidus de jardin. Dans le tableau 5.3, nous faisons correspondre les matières aux différentes catégories.

TAB. 5.2 – Caractéristiques des matières

<i>matière</i>	<i>prop.</i> (%)	<i>cendre</i> (%)	<i>PC</i> (KJ\ kg)	<i>recyclable</i> <i>ou compostable</i>
<i>journal</i>	11.19	1.5	12958	<i>r et c</i>
<i>papier_fin</i>	2.14	6.0	11302	<i>r et c</i>
<i>papier_glace</i>	3.55	23.3	11212	<i>r</i>
<i>papier_melange</i>	6.71	6.0	12372	<i>r et c</i>
<i>carton_ondule</i>	2.68	5.0	11938	<i>r et c</i>
<i>carton_general</i>	4.69	5.0	11617	<i>r et c</i>
<i>verre_clair</i>	2.95	98.9	67	<i>r</i>
<i>verre_couleur</i>	2.23	98.9	67	<i>r</i>
<i>verre_autre</i>	0.97	98.9	67	<i>r</i>
<i>pet</i>	0.29	0.4	34677	<i>r</i>
<i>pehd</i>	1.66	0.4	33235	<i>r</i>
<i>ferreux</i>	3.72	90.5	1409	<i>r</i>
<i>aluminium_boisson</i>	0.10	90.5	0	<i>r</i>
<i>aluminium_autre</i>	0.41	90.5	7863	<i>r</i>
<i>bois</i>	2.33	1.0	11303	<i>c</i>
<i>r_cuisine</i>	24.47	5.0	2160	<i>c</i>
<i>herbe</i>	2.04	6.3	2418	<i>c</i>
<i>branche</i>	3.00	6.3	2280	<i>c</i>
<i>feuille</i>	4.29	6.3	2711	<i>c</i>
<i>autre</i>	20.40	46.3	13009	

TAB. 5.3 – Noms courants des matières recyclables ou compostables

catégorie	matières
papier	<i>journal, papier_fin, papier_glace</i>
carton	<i>carton_ondule, carton_general</i>
contenants	<i>pet, pehd, ferreux, aluminium_boisson, aluminium_autre verre_clair, verre_couleur, verre_autre</i>
résidus de cuisine	<i>r_cuisine</i>
résidus de jardin	<i>herbe, feuille, branche</i>

5.1.2 Les modes de collecte

Classification

Nous distinguons deux catégories de modes de collecte : *les collectes sélectives* et *la collecte régulière*. La collecte régulière permet de ramasser les déchets résiduels suite aux collectes sélectives. Les matières recueillies lors de la collecte régulière peuvent être traitées par les technologies de tri-compostage, par les incinérateurs ou par les technologies d'enfouissement. Les collectes sélectives sont destinées au marché, au tri et/ou au compostage. Les collectes destinées exclusivement au tri sont : la collecte porte à porte des matières recyclables (*recy*), la collecte du papier journal et des contenants (*recy_reduit*), la collecte des contenants (*col_cont*) et la collecte par apport volontaire des matières recyclables (*recy_vol*). Parmi les collectes destinées au compostage, on cite la collecte des résidus de cuisine (*col_cuis*) et celles des résidus de jardin à savoir l'herbe (*col_herbe*), les feuilles (*col_feuille*) et les branches (*col_branche*). Les collectes destinées aux technologies de compostage et pouvant aussi être traitées par les centres de tri sont la collecte du papier (*col_pap*) et celle du carton (*col_cart*). Le tableau 5.4 identifie les matières composant les différentes collectes sélectives et les méthodes de traitement réservées à ces collectes.

TAB. 5.4 – Définition et traitement des collectes sélectives

collecte	composition	traitement
<i>recy</i>	papier, carton, contenants	tri
<i>recy_vol</i>	papier, carton, contenants	tri
<i>recy_reduit</i>	journal, contenants	tri
<i>col_cont</i>	contenants	tri
<i>col_cuisine</i>	r_cuisine	compostage
<i>col_herbe</i>	herbe	compostage
<i>col_feuille</i>	feuille	compostage
<i>col_branche</i>	branche	compostage
<i>col_pap</i>	journal, papier_fin	compostage, tri
<i>col_cart</i>	carton	compostage, tri

Taux de déviation

Le taux de chaque matière recueillie par une collecte sélective est appelé *taux de déviation* de cette matière par cette collecte. Il est le produit du *taux de participation* des citoyens à la collecte et du *taux de saisie* de la matière.

- i) Le taux de participation est la proportion des gens qui accepteraient de faire la séparation à la source en vue de cette collecte. Il est estimé à 80% pour les collectes porte à porte de matières recyclables, 20% pour la collecte par apport volontaire des matières recyclables et 30% pour les collectes porte à porte des matières organiques.
- ii) Le taux de saisie d'une matière est la proportion récupérable de cette matière par les gens qui participent. Le tableau (5.5) montre l'estimation du *taux de saisie* des matières récupérables par les collectes sélectives considérées.

Par définition, le taux de déviation de matières par une collecte sélective est la proportion de matières produites aux sources, pouvant être recueillies par cette collecte. Il est obtenu en faisant la somme pour toutes les matières des produits entre leur proportion à la source et leur taux de déviation par cette collecte.

TAB. 5.5 – Taux de saisie

matière	taux de saisie
<i>journal</i>	0.90
<i>papier_fin</i>	0.65
<i>papier_glace</i>	0.70
<i>papier_melange</i>	0.60
<i>carton_ondule</i>	0.75
<i>carton_general</i>	0.65
<i>verre_clair</i>	0.75
<i>verre_couleur</i>	0.75
<i>verre_autre</i>	0.75
<i>pet</i>	0.75
<i>pehd</i>	0.65
<i>ferreux</i>	0.75
<i>aluminium_boisson</i>	0.80
<i>aluminium_autre</i>	0.75
<i>r_cuisine</i>	0.70
<i>herbe</i>	0.70
<i>branche</i>	0.70
<i>feuille</i>	0.70

Combinaisons de collectes

A chaque source, et à chaque période, une et une seule combinaison de collectes sélectives est choisie. Les collectes qui n'ont pas de matières en commun peuvent être choisies en même temps. Dans le tableau 5.6 les combinaisons possibles de collectes sélectives sont définies. La fréquence de la collecte régulière et des collectes sélectives porte à porte dépend de la combinaison choisie. Trois cas peuvent se présenter :

- i) La combinaison ne comprend aucune collecte sélective porte à porte : la fréquence de la collecte régulière est évaluée à 1.38 soit environ trois fois aux deux semaines ;
- ii) La combinaison contient des collectes porte à porte de matières recyclables

TAB. 5.6 – Combinaisons de collectes sélectives

combinaison	collectes
A	<i>recy</i>
B	<i>recy_red</i>
C	<i>recy_vol</i>
D	<i>col_herbe, col_branche, col_feuille</i>
E	<i>col_cuis</i>
F	<i>recy, col_herbe, col_branche, col_feuille</i>
G	<i>recy_red, col_herbe, col_branche, col_feuille</i>
H	<i>recy_vol, col_herbe, col_branche, col_feuille</i>
I	<i>col_herbe, col_branche, col_feuille, col_cuis</i>
J	<i>recy, col_cuis</i>
K	<i>recy_red, col_cuis</i>
L	<i>recy_vol, col_cuis</i>
M	<i>recy, col_herbe, col_branche, col_feuille, col_cuis</i>
N	<i>recy_red, col_herbe, col_branche, col_feuille, col_cuis</i>
O	<i>recy_vol, col_herbe, col_branche, col_feuille, col_cuis</i>
P	<i>col_cuis, col_pap, col_cart</i>
Q	<i>col_pap, col_cart, col_cont</i>

mais pas de collecte sélective de matières organiques ou la combinaison contient des collectes sélectives de matières organiques mais ne contient aucune collecte porte à porte de matières recyclables. Dans ce cas la fréquence de chaque collecte choisie (régulière ou sélective) est égale à 1 ;

- iii) La combinaison contient à la fois des collectes sélectives porte à porte des matières organiques et des collectes sélectives porte à porte de matières recyclables. Alors la fréquence de la collecte régulière est égale à 1 et la fréquence de chaque collecte sélective choisie est égale à 0.7346.

Coûts de collecte

Trois composantes sont considérées dans l'estimation des coûts associés à la collecte : *l'investissement, la collecte et le transport.*

i) *Investissement*

Cette composante inclut les coûts liés au démarrage d'une nouvelle collecte et comprend le coût de sensibilisation et le coût du matériel (bac de recyclage). Le coût de sensibilisation est fixé à 7.29 dollars par période et par logement. Le coût du matériel est également donné par logement et par période. Il est de 5 dollars pour les collectes porte à porte de matières recyclables, 6.5 dollars pour la collecte par apport volontaire des matières recyclables et de 54.15 dollars pour les collectes de matières compostables non recyclables [41].

ii) *Collecte*

En comparant plusieurs sources d'information, Soucy [41] a développé une formule permettant de calculer, pour chaque combinaison de collectes, le coût (c_{rec}) de collectes porte à porte de matières recyclables, le coût (c_{comp}) de collectes porte à porte de matières compostables non recyclables, le coût (c_{vol}) de collecte par apport volontaire de matières recyclables et le coût (c_{reg}) de collecte régulière. Ces coûts sont donnés par les équations :

$$\begin{aligned} c_{rec} &= f_x * \max\{(183.5 - 393.5x), (46 - 19x)\}; \\ c_{comp} &= f_y * \max\{(183.5 - 393.5y), (46 - 19y)\}; \\ c_{vol} &= 121; \\ c_{reg} &= f_w * (46 - 19w). \end{aligned}$$

où

- x : taux de déviation de matières au moyen des collectes porte à porte de matières recyclables;
- y : taux de déviation de matières au moyen des collectes porte à porte de matières compostables non recyclables;
- w : taux de matières recueillies au moyen de la collecte régulière;

f_w : fréquence de la collecte régulière;

f_x : fréquence des collectes porte à porte de matières recyclables;

f_y : fréquence des collectes sélectives de matières organiques.

Le coût unitaire de la collecte par apport volontaire des matières recyclables est fixé à 121 dollars.

iii) *Le transport*

Le coût total de transport dépend à la fois des quantités transportées, des modes de transport utilisés et des distances parcourues. À chaque mode de collecte correspond un mode de transport. Les autres modes de transport représentent les différents types de véhicules utilisés entre les sites. Nous supposons un coût de 0.51 dollars par tonne et par kilomètre pour tous les modes de transport.

5.1.3 Les sites

Les sites représentent les emplacements physiques où des technologies sont ou peuvent être implantées. Nous distinguons deux catégories de sites : les sites existants et les sites potentiels. Le tableau 5.7 présente pour les sites existants et potentiels, les technologies existantes ou pouvant y être construites, la superficie totale (*sup.*), la superficie utilisée (*sup. ut.*) et le coût unitaire du terrain.

Nous avons retenu 10 sites potentiels identifiés par une étude de l'Université McGill [53], qui sont notés : M10, M24, M65, M66, M67, M68, M69, M78, M79 et M143. Les sites existants appartiennent à la ville de Montréal et sont :

- i) le *Complexe Environnemental de Saint Michel* (appelé aussi *CTED*) qui comprend un centre de tri et le site d'enfouissement le plus important de la ville de Montréal;
- ii) le site *Demix* qui était utilisé pour l'enfouissement des cendres de l'ancien incinérateur des Carrières;
- iii) le site *Carrière* où se trouve l'incinérateur des Carrières qui n'est pas actuellement en usage. Comme il existe une technologie permettant la restauration

de cet incinérateur, le site est conservé.

La superficie du CTED est de 190 ha ; 10 ha sont alloués au tri, 40 ha au compostage, 60 ha pour la technologie existante d'enfouissement et 15 ha à l'enfouissement selon les nouvelles normes d'imperméabilisation. Ceci revient à subdiviser le CTED en 4 sites : *CTED_tri*, *CTED_compo*, *CTED_1* et *CTED_2*.

TAB. 5.7 – Informations sur les sites

<i>site</i>	<i>technologies</i>	<i>sup.</i> (ha)	<i>sup. ut.</i> (ha)	<i>coût</i> (10 ³ \$/ ha)
CTED_tri	tri	10.0	4.4	
CTED_compo	compostage	40.0	0.0	
CTED_1	enfouissement	60.0	60.0	
CTED_2	enfouissement	15.0	0.0	
Carrières	incinération	6.0	0.0	
M10	tri, compostage	36.0		269.7
M24	tri	13.5		347.7
M65	tri,compostage	10.0		161.5
Demix	incinération	infinie		
M66	enfouissement, tri compostage, incinération	30.0		215.3
M67	enfouissement, tri compostage	60.0		215.3
M68	enfouissement, tri compostage, incinération	48.0		215.3
M69	enfouissement, tri	69.8		189.1
M78	tri	24.0		215.3
M79	incinération	4.2		215.3
M143	compostage, incinération	37.0		687.8

5.1.4 Les technologies de traitement

Classification

Nous distinguons quatre filières de traitement : le compostage, le tri, l'incinération et l'enfouissement. Cinq classes de technologies de traitement sont définies : les technologies de compostage sélectif, les technologies de tri-compostage, les centres de tri, les incinérateurs et les sites d'enfouissement. Le tableau (5.8) donne la correspondance entre les filières et les classes de technologies, ainsi que la répartition des technologies dans les différentes classes.

– La filière de compostage

11 technologies de compostage ont été modélisées : 2 technologies de tri-compostage et 9 technologies de compostage sélectif. Les technologies de tri-compostage permettent de traiter le sac vert pur ou le sac vert résiduel de collectes sélectives de matières recyclables. Les deux technologies retenues pour le tri-compostage sont appelées respectivement *cylindre rotatif* et *réservoir*. La différence entre ces technologies découle de l'ensemble des techniques utilisées pour trier les matières recyclables et pour réduire en compost les matières compostables.

Les technologies de compostage sélectives sont conçues pour traiter essentiellement les collectes sélectives de matières compostables. Elles sont regroupées en trois catégories selon la protection requise des matières contre les rigueurs du climat.

- La première catégorie comprend les technologies *biocellules intérieures* (*biocel_int*), *couloir* et *tunnel*. Le compostage est fait sous un bâtiment. Les techniques utilisées pour réduire les matières en compost permettent de distinguer ces technologies ;
- La deuxième catégorie comprend les technologies *andains-ensachés*, *biocellules extérieures* (*biocel_ext*) et *conteneur*. Le compostage se fait à l'extérieur mais les matières sont protégées des rigueurs du climat. La différence entre ces technologies découle des techniques utilisées pour réduire les matières en compost et pour les protéger ;

- La troisième catégorie comprend les technologies *andains sur plate-forme*. Le matériel composté est exposé aux rigueurs du climat. Trois types de plates-formes sont considérés : la “plate-forme-asphalte” (*plate_f_a*), la “plate-forme-béton” (*plate_f_b*) et la “plate-forme-gravier” (*plate_f_g*).
- *La filière d’incinération*
Tous les incinérateurs considérés sont utilisés pour réduire les résidus en cendres et produire de l’électricité. Deux technologies ont été modélisées : les incinérateurs modulaires (*inc_mod*) et les incinérateurs de masse (*inc_masse*). Un incinérateur modulaire est une unité mobile de capacité inférieure à 125,000 tonnes par année, tandis qu’un incinérateur de masse est un incinérateur de capacité supérieure à 125,000 tonnes par année. Une troisième technologie d’incinération correspond à la restauration de l’ancien incinérateur des carrières (*inc_carr*) d’une capacité de 350,000 tonnes par année.
- *La filière d’enfouissement* comprend une seule classe de technologies : les technologies d’enfouissement. Nous distinguons deux types de technologies d’enfouissement : la technologie d’enfouissement existante au complexe environnemental de Saint Michel (*enf_CTED_1*) et les technologies d’enfouissement qui doivent satisfaire les nouvelles normes d’imperméabilisation. Comme les paramètres d’investissement et les coûts d’opération de ces technologies dépendent notamment de leur emplacement, les noms de ces technologies font référence aux des sites pouvant les accueillir : *enf_CTED_2*, *enf_M66*, *enf_M67*, *enf_M68* et *enf_M69*.

TAB. 5.8 – Les technologies

<i>filière</i>	<i>classe</i>	<i>technologies</i>
compostage	technologies de compostage sélective	<i>plate_f_g, plate_f_a</i> <i>plate_f_b, andain_ensache,</i> <i>conteneur,biocel_ext, biocel_int,</i> <i>couloir,tunnel</i>
	technologies de tri-compostage	<i>cyl_rot, reservoir</i>
tri	centres de tri	<i>tri_1,tri_2</i>
incinération	incinérateurs	<i>inc_mod,inc_masse</i> <i>inc_carr</i>
enfouissement	technologies d'enfouissement	<i>enf_CTED_1, enf_CTED_2</i> <i>enf_M66, enfM_67</i> <i>enf_M68, enf_M69</i>

Les paramètres d'investissement

i) *Les coûts d'investissement*

Rappelons que pour chaque procédé, deux fonctions d'investissement sont considérées : le coût d'installation initial et le coût d'ajout de capacité pour une technologie existante. Ces fonctions sont concaves et non linéaires. Elles sont approximées par des fonctions linéaires par morceaux. Les paramètres définissant les approximations linéaires des fonctions d'investissement sont donnés au tableau 5.9.

TAB. 5.9 – Coûts d'investissement

<i>technologie</i>	<i>k_c</i>	<i>fix_c</i>	<i>var_c</i>	<i>k_a</i>	<i>fix_a</i>	<i>var_a</i>
<i>inc_masse</i>	1	15824.00	484.38	1	1881.00	435.03
<i>inc_mod</i>	1	479.87	262.42	1	479.87	262.42
<i>inc_carr</i>	1	112191.00	0.00	1	1881.00	435.03
<i>tri_1</i>	1	847.28	162.64	1	0.00	158.60
	2	5539.60	60.71	2	4577.96	59.23
<i>tri_2</i>	1	611.16	120.07	1	0.00	117.10
	2	4079.70	44.720	2	3384.01	43.63
<i>plate_f_g</i>	1	212.20	8.29	1	0.00	8.29
<i>plate_f_a</i>	1	569.07	11.79	1	0.00	11.79
<i>plate_f_b</i>	1	555.67	20.13	1	0.00	11.79
<i>andain_ensache</i>	1	639.98	2.92	1	0.00	2.92
	2	715.00	1.50	2	75.02	1.50
<i>conteneur</i>	1	131.30	0.053	1	0.00	0.053
<i>biocel_ext</i>	1	518.33	311.27	1	0.00	311.27
<i>biocel_int</i>	1	119.62	258.20	1	0.00	258.20
<i>couloir</i>	1	1343.50	72.18	1	0.00	72.18
<i>tunnel</i>	1	641.23	134.24	1	0.00	134.24
<i>cyl_rot</i>	1	641.23	336.11	1	0.00	336.11
<i>reservoir</i>	1	7174.60	191.53	1	0.00	191.53
<i>enf_CTED_2</i>	1	0.00	7.20	1	0.00	7.20
<i>enf_M66</i>	1	12856.00	10.03	1	0.00	10.03
<i>enf_M67</i>	1	12876.00	9.96	1	0.00	9.96
<i>enf_M68</i>	1	12869.00	9.98	1	0.00	9.98
<i>enf_M69</i>	1	12926.00	1.96	1	0.00	1.96

Les notations k_c , fix_c et var_c représentent respectivement l'indice du segment, le coût fixe et le coût variable d'investissement pour l'installation. De la même façon, k_a , fix_a et var_a représentent respectivement l'indice du segment, le coût fixe et le coût variable d'investissement pour l'ajout de capacité. Les unités utilisées sont des dollars par m^3 pour les technologies d'enfouissement et des dollars par tonne pour les autres technologies.

ii) *Durée de vie, superficie et limites sur les capacités*

Ces paramètres sont fournis au tableau 5.10. La durée de vie est évaluée en nombre de périodes. La superficie unitaire requise est en ha par millier de m^3 pour les technologies d'enfouissement et en ha par millier de tonnes par année pour les autres technologies. La superficie minimale est en ha . Les unités de capacité (minimale et maximale) sont des milliers de m^3 pour l'enfouissement ou des milliers de tonnes par année pour les autres procédés. Le paramètre *Grand_M* qui remplace la capacité maximale lorsqu'elle n'est pas donnée est fixé à 5,000,000 m^3 pour les technologies d'enfouissement et à 1,000,000 t/an pour les autres technologies.

Coût d'opération, coût de maintenance et facteur d'utilisation

Les coûts de maintenance ($fixom$) sont reliés aux capacités existantes. Ils comprennent les coûts d'entretien des bâtiments et des équipements, les assurances et les taxes. Le coût d'opération ($varom$) dépend de l'activité totale annuelle de chaque technologie. Il comprend le coût de la main d'oeuvre, les services de base et le coût du combustible. Le facteur d'utilisation (fu_{max}) est la proportion de la capacité existante pouvant être utilisée afin de tenir compte des périodes d'inactivité (maintenance, inspection). Ces paramètres sont donnés au tableau 5.11.

TAB. 5.10 – Durée de vie, superficie requise et limites de capacité

<i>technologie</i>	<i>vie</i>	<i>sup_min</i> (ha)	<i>sup_unit</i>	<i>cap_min</i>	<i>cap_max</i>
<i>inc_masse</i>	4	3.0439	0.0081	125.0	1000.0
<i>inc_mod</i>	2		0.032	0.0	125.0
<i>inc_carr</i>	4	3.0439	0.0081	350.0	350.0
<i>tri_1</i>	4	4	0.0042	0.0	1000.0
<i>tri_2</i>	4	4	0.0042	0.0	1000.0
<i>plate_f_g</i>	4	0.0	0.12	0.0	1000.0
<i>plate_f_a</i>	2	0.0	0.12	0.0	1000.0
<i>plate_f_b</i>	2	0.0	0.12	0.0	1000.0
<i>andain_ensache</i>	2	0.5608	0.085	0.0	1000.0
<i>conteneur</i>	6	0.1419	0.0534	1.1	50.5
<i>biocel_ext</i>	6	0.0733	0.0327	2.0	30.0
<i>biocel_int</i>	5	0.0440	0.1485	1.0	1000.0
<i>couloir</i>	3	0.0050	0.0269	2.0	50.0
<i>tunnel</i>	5	0.0440	0.1485	2.0	100.0
<i>reservoir</i>	4	1.3765	0.0522	2.5	100.0
<i>cyl_rot</i>	6	0.0755	0.0522	2.5	16.0
<i>enf_CTED_2</i>	4		0.0010	0.0	5000.0
<i>enf_M66</i>	4	0.0	0.0125	0.0	2400.0
<i>enf_M67</i>	4	0.0	0.0125	0.0	4800.0
<i>enf_M68</i>	4	0.0	0.0125	0.0	3840.0
<i>enf_M69</i>	4	0.0	0.003125	0.0	5000.0

TAB. 5.11 – Maintenance, opération et facteur d'utilisation

<i>technologie</i>	<i>fixom</i>	<i>varom</i>	<i>fu_max</i>
<i>inc_masse</i>	31.00	15.41	0.85
<i>inc_mod</i>	28.00	15.41	0.90
<i>inc_carr</i>	31.00	15.41	0.85
<i>tri_1</i>	8.90	40.0	1
<i>tri_2</i>	8.90	30.0	1
<i>plate_f_g</i>	0.47	0.78	0.99
<i>plate_f_a</i>	0.64	1.54	0.99
<i>plate_f_b</i>	0.96	1.67	0.99
<i>andain_ensache</i>	0.63	10.32	0.99
<i>conteneur</i>	1.49	17.65	0.98
<i>biocel_ext</i>	11.50	17.50	0.98
<i>biocel_int</i>	9.00	14.00	0.98
<i>couloir</i>	3.24	14.05	0.98
<i>tunnel</i>	7.20	10.00	0.97
<i>reservoir</i>	14.62.	53.76	0.97
<i>cyl_rot</i>	13.12.	44.14	0.97
<i>enf_CTED_1</i>	0.21	16.12	1
<i>enf_CTED_2</i>	0.21	15.00	1
<i>enf_M66</i>	0.40	17.10	1
<i>enf_M67</i>	0.00	16.34	1
<i>enf_M68</i>	0.39	16.53	1
<i>enf_M69</i>	0.00	15.08	1

Extrants des unités de traitement

Les extrants des unités de traitement sont des matières conditionnées pour le marché de recyclage, du compost, de l'énergie et des résidus. Ce qui est produit dépend à la fois des matières traitées et de la technologie utilisée.

- Au niveau des centres de tri, 95% du tonnage total de matières triées est transformé en matières conditionnées pour le marché de recyclage. Les rejets représentent 5% de la quantité totale en tonne traitée. Ils peuvent être compostés, incinérés ou enfouis.
- Au niveau des technologies de compostage sélectif, le compost est la seule matière produite avec une réduction de 30% de la masse totale traitée. En d'autres mots, la quantité totale en tonnes du compost produit correspond à 70% de la quantité totale en tonnes de matières traitées. La qualité du compost dépend des modes opératoires utilisés. On distingue 3 degrés de compost : le *compostAA*, le *compostA* et le *compostB*. Quarante recettes, présentées dans Ratel [40] sont disponibles pour la production des différents degrés de compost.
- Au niveau des technologies de tri-compostage, les matières recyclables non compostables sont triées et les matières compostables sont compostées : 90% du tonnage total de matières recyclables triées est transformé en matières conditionnées pour le marché de recyclage et 10% deviennent des rejets. Le tonnage du compost produit correspond à 70% du tonnage total des matières compostables traitées. Les matières non compostables et non recyclables sont rejetées et peuvent être enfouies ou incinérées.
- Au niveau des incinérateurs, les matières traitées sont réduites en cendres et l'énergie produite au moment de l'incinération est récupérée. Le tableau 5.2 donne les facteurs de réduction en cendres et le pouvoir calorifique des différentes matières. La quantité d'énergie théoriquement produite (en *kwh/t*) est obtenue en supposant une transformation parfaite qui amènerait 1 *kwh* pour chaque 3600 *KJ* [34]. Pour calculer l'énergie réelle, on tient compte des pertes en multipliant la quantité théorique par un facteur de rendement qui est de 0.15 pour les incinérateurs modulaires et de 0.23 pour les incinérateurs

de masse.

5.1.5 Les marchés

Ben Abdalha [3] a rassemblé les prix de matières recyclables entre 1993 et 1996, reçus de la compagnie *Recy-Québec*. Nous avons retenu, dans notre base de données, la moyenne des prix de 1996. Le tableau 5.12 donne une estimation des prix des matières recyclables, du compost et de l'énergie. Le mot "*marché*" ajouté aux noms des matières indique qu'elles ont été traitées par un centre de tri.

TAB. 5.12 – Prix des matières et de l'énergie

<i>produit</i>	<i>prix</i>
<i>journal_marché</i>	37.70 \$/t
<i>papier_fin_marché</i>	158.62 \$/t
<i>papier_glacé_marché</i>	158.62 \$/t
<i>papier_melange_marché</i>	12.78 \$/t
<i>carton_ondule_marché</i>	79.03 \$/t
<i>carton_général_marché</i>	79.03 \$/t
<i>verre_clair_marché</i>	31.11\$/t
<i>verre_couleur_marché</i>	7.22 \$/t
<i>verre_autre_marché</i>	2.50 \$/t
<i>pet_marché</i>	421.14 \$/t
<i>pehd_marché</i>	233.87 \$/t
<i>ferreux_marché</i>	68.89 \$/t
<i>aluminium_boisson_marché</i>	1252.95 \$/t
<i>aluminium_autre_marché</i>	1252.95 \$/t
<i>compostAA</i>	30.00 \$/t
<i>compostA</i>	26.15 \$/t
<i>compostB</i>	2.91 \$/t
<i>électricité</i>	0.023 \$/kwh

5.1.6 Les indices environnementaux

Comme les paramètres techno-économiques, les impacts environnementaux guident le choix du type et de la localisation des investissements. Les critères retenus sont : la pollution des eaux et des sols, la pollution de l'air, le bruit, les odeurs, l'aménagement du territoire, la qualité de la faune et de la flore, la santé et la sécurité de la population, l'esthétique visuelle, le développement du territoire et la perception sociale. Après avoir évalué des indicateurs permettant de mesurer les différents types d'impacts, Vaillancourt [48] a procédé à une étude multi-critère pour obtenir les indices globaux associés aux affectations possibles des technologies aux sites. Ces indices sont présentés dans les tableaux (5.13- 5.16). Ils ont des valeurs comprises entre 0 et -2, les valeurs les plus proches de 0 correspondant aux affectations qui comportent moins de risques environnementaux.

TAB. 5.13 – Indices des technologies de compostage

	CTED	M10	M65	M66	M67	M68	M143
<i>plate_f_g</i>	-1.14	-1.02	-1.08	-1.14	-1.10	-1.10	-1.22
<i>plate_f_a</i>	-1.14	-1.02	-1.08	-1.14	-1.10	-1.10	-1.22
<i>plate_f_b</i>	-1.14	-1.02	-1.08	-1.14	-1.10	-1.10	-1.22
<i>andains_ensache</i>	-1.15	-1.01	-1.06	-1.14	-1.10	-1.10	-1.23
<i>conteneur</i>	-1.14	-1.00	-1.06	-1.14	-1.12	-1.10	-1.25
<i>biocel_ext</i>	-1.04	-0.89	-1.06	-1.05	-1.02	-1.01	-1.17
<i>biocel_int</i>	-1.01	-0.86	-0.94	-0.97	-0.94	-0.93	-1.09
<i>couloir</i>	-0.98	-0.84	-0.91	-0.95	-0.91	-0.91	-1.06
<i>tunnel</i>	-0.86	-0.79	-0.87	-0.89	-0.84	-0.85	-1.01
<i>reservoir</i>	-1.22	-1.08	-1.16	-1.24	-1.24	-1.19	-1.35
<i>cyl_rot</i>	-0.91	-0.84	-0.92	-0.94	-0.89	-0.90	-1.06

TAB. 5.14 – Indices des centres de tri

	CTED	M10	M24	M65	M66	M67	M68	M69	M78
<i>tri_1</i>	-0.76	-0.73	-0.82	-0.81	-0.83	-0.78	-0.79	-0.77	-0.82
<i>tri_2</i>		-0.73	-0.82	-0.81	-0.83	-0.77	-0.79	-0.76	-0.82

TAB. 5.15 – Indices des incinérateurs

	Carrieres	M10	M66	M68	M79	M143
<i>inc_masse</i>		-0.95	-1.07	-1.02	-1.12	-1.22
<i>inc_mod</i>		-0.96	-1.09	-1.03	-1.14	-1.23
<i>inc_carr</i>	-1.12					

TAB. 5.16 – Indices des technologies d'enfouissement

	CTED	Demix	M66	M67	M68	M69
<i>enf_Demix</i>		-1.13				
<i>enf_M66</i>			-1.25			
<i>enf_M67</i>				-1.22		
<i>enf_M68</i>					-1.21	
<i>enf_M69</i>						-1.21
<i>enf_CTED_1</i>	-1.31					
<i>enf_CTED_2</i>	-1.26					

5.2 Les scénarios

La quantité totale des déchets enfouis représente souvent, pour plusieurs intervenants du domaine de la gestion de déchets, un indicateur important de l'efficacité environnementale d'une gestion intégrée. Cet indicateur n'est cependant pas complet puisque minimiser l'enfouissement peut se faire au coût d'installation d'incinérateurs avec un impact environnemental non négligeable. Si ces derniers sont interdits, le coût d'implantation de nouvelles filières peut s'avérer prohibitif ou impossible à réaliser. L'exploitation de différents moyens d'intervention peut se faire à l'aide de scénarios où un ensemble d'hypothèses de modélisation et/ou des paramètres sont fixés. On peut penser à des variations sur : *l'ensemble des technologies admissibles, les limites sur l'enfouissement, les limites sur les indices environnementaux, la taxe à l'enfouissement ou l'ensemble de matières admissibles à l'enfouissement.*

1. *L'ensemble des technologies admissibles*

Comme on a vu dans le chapitre précédent, la fonction objectif principale consiste en la minimisation des coûts. Ainsi, les filières de traitement les moins coûteuses sont souvent les premières à être sélectionnées. Par exemple, la présence d'incinérateurs dans l'ensemble des technologies disponibles peut nuire au choix des technologies de compostage. Par conséquent, dans certains scénarios nous interdisons les incinérateurs.

2. *Les limites sur l'enfouissement (total ou partiel)*

Lorsqu'on fixe un objectif d'enfouissement, on réduit l'ensemble de solutions réalisables en introduisant une nouvelle contrainte. La solution optimale doit satisfaire à cette contrainte. D'autre part, le paramètre *taux minimal de déviation* est introduit pour limiter inférieurement la proportion entre la quantité de matières qui n'est pas enfouie directement et la quantité totale produite annuellement. Fixer ce taux permet également de réduire l'enfouissement annuel pour chacune des périodes.

3. *La limite sur les indices environnementaux*

Ce critère permet d'éliminer certaines affectations des technologies aux sites. Les investissements ne satisfaisant pas cette contrainte ne sont pas autorisés. Une autre façon de contrôler les impacts environnementaux consiste à définir une limite sur la somme des indices globaux des technologies existantes en chaque période.

4. *La taxe à l'enfouissement*

La taxe à l'enfouissement permet de décourager l'enfouissement. Pour encourager l'introduction de nouvelles technologies, certaines municipalités choisissent de faire payer plus à l'enfouissement. Ainsi ces technologies sont subventionnées en partie par des pénalités payées par ceux qui continuent à enfouir.

5. *Les matières admissibles*

Le réemploi, le recyclage et le compostage sont les modes de traitement les plus nobles, selon les écologistes. Une des mesures utilisées par les municipalités pour encourager ces méthodes est l'interdiction d'enfouir les matières organiques et les matières recyclables pour lesquelles le marché est assuré.

On veut analyser, pour la ville de Montréal, le coût et l'impact sur les choix technologiques de contraintes sur la quantité totale enfouie. Pour ce faire, on a défini un ensemble de scénarios où d'une part les limites sur l'enfouissement et d'autre part l'ensemble des technologies disponibles varient. En prenant comme objectif global la minimisation du coût total du système, on compare les solutions optimales obtenues en modifiant certains paramètres de scénario.

Le tableau 5.17 présente les technologies et les niveaux d'enfouissement associés aux scénarios. En faisant varier les technologies disponibles (*Base*, *Inc*, *IncTc*, et *Env*) et le niveau d'enfouissement (∞ , 9, 7, 5, 3 ou 0) on obtient au maximum $4 \times 6 = 24$ scénarios différents. Ainsi, un scénario consistera en une combinaison d'un ensemble de technologies disponibles et d'une limite sur l'enfouissement. Son nom fera référence à ces deux paramètres. Par exemple on obtient :

Base $_{\infty}$: minimiser les coûts en autorisant toutes les technologies et en ne faisant pas de restrictions sur l'enfouissement ;

- Inc*₀ : minimiser les coûts sous la contrainte d'enfouissement minimal, en interdisant les incinérateurs;
- Env*₃ : minimiser les coûts sous la contrainte d'enfouir moins que 3 millions de m^3 pendant 20 ans, en interdisant les investissements dans les technologies pour lesquelles l'indice environnemental global ne dépasse pas -1 .

TAB. 5.17 – Paramètres de scénario

<i>enfouissement</i>		<i>technologies</i>	
aucune limite	∞	toutes	<i>Base</i>
$\leq 9,042,300 \text{ m}^3$	9	incinérateur interdit	<i>Inc</i>
$\leq 7,000,000 \text{ m}^3$	7	incinérateur	<i>IncTc</i>
$\leq 5,000,000 \text{ m}^3$	5	et tri-compostage interdits	
$\leq 3,000,000 \text{ m}^3$	3	investissements permis si	<i>Env</i>
minimal	0	indice global ≥ -1	

5.3 Les résultats

La planification est faite pour un horizon de 20 ans subdivisé en 4 périodes de 5 ans. Le taux annuel d'actualisation est fixé à 7 %. Nous représentons les résultats en regroupant pour chaque ensemble de technologies disponibles, les 6 scénarios dérivés de la variation du niveau d'enfouissement. Pour chaque groupe, nous étudions la variation du coût du système en fonction la limite sur l'enfouissement. Nous faisons ensuite une analyse sur le choix technologique pour la collecte et le traitement des matières.

5.3.1 Les scénarios $Base_*$

Les coûts

Dans le scénario $Base_\infty$, la quantité totale enfouie pendant 4 périodes est de 10,030, 900 m^3 et le coût total du système est 309,946,800\$. Les autres niveaux d'enfouissement représentent une réduction de 10, 30, 50, 70 ou 90 pour cent par rapport à l'enfouissement total obtenu dans le scénario $Base_\infty$. Le montant supplémentaire associé à ces limites à l'enfouissement est de 11, 40, 70, 120 ou 237 millions de dollars. La figure 5.1 présente le coût total du système en fonction du volume total réduit. L'abscisse représente la réduction de l'enfouissement par rapport à $Base_\infty$ (en millions de m^3) tandis que l'ordonnée représente le coût total du système (en millions de dollars). Comme la fonction est convexe, le coût unitaire à payer augmente suivant le volume réduit. Le coût unitaire à payer par m^3 est de 11 \$ pour le premier million de m^3 réduit et 13 \$, 15 \$, 24 \$ et 62 \$ respectivement pour les autres tranches de 2 millions de m^3 à réduire. Le scénario $Base_0$ correspond à un enfouissement de 1,286,500 m^3 à un coût total de 536,454,500 \$.

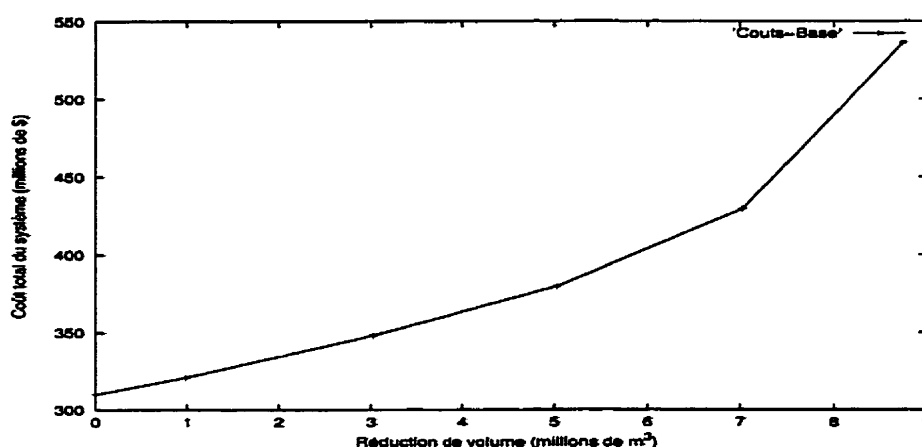


Figure 5.1 – $Base_*$: le coût total en fonction de la réduction de l'enfouissement

Le coût total du système est payé de façon indirecte ou directe par tous les citoyens. Pour obtenir le coût annuel par logement, en supposant que les ménages se partagent, de façon équitable, le montant total à payer, il suffirait de diviser le coût total par le nombre d'années et par le nombre de logements. La colonne 2 du tableau

5.18 montre le coût annuel par logement des différents scénarios. Il est à noter que les coûts contenus dans le tableau 5.18 sont évalués en fonction de la valeur monétaire de la première année de planification. Pour les autres années, une estimation peut être calculée en tenant compte du facteur d'actualisation. Il est possible de faire des estimations pour chaque période, en faisant une moyenne sur toutes les années comprises dans la période.

La masse totale enfouie varie suivant les limites imposées à l'enfouissement. Par exemple, le scénario $Base_3$ correspond à une masse totale enfouie de 2,033,600 tonnes, tandis que le scénario $Base_{\infty}$ correspond à une masse totale enfouie de 5,529,600 tonnes. On se rend compte que, en raison du faible coût d'enfouissement, le coût total du système est moins élevé (scénario $Base_{\infty}$) quand l'enfouissement devient important. On se demande ainsi quel serait la taxe ou le coût additionnel d'enfouissement qui rendrait la solution optimale du scénario $Base_{\infty}$ au moins aussi dispendieuse que celles des autres scénarios. Si on prend l'exemple du scénario $Base_3$, le coût additionnel de ce scénario par rapport au scénario $Base_{\infty}$, réparti équitablement sur la masse totale enfouie dans le scénario $Base_{\infty}$, donne un coût moyen de 19.66 \$ par tonne. L'introduction d'une taxe à l'enfouissement supérieure à ce coût, pour chaque tonne enfouie rendrait le scénario $Base_{\infty}$ apparemment plus dispendieux que le scénario $Base_3$. Ceci encouragerait le citoyen, si le choix ne dépend que de lui, à préférer le scénario $Base_3$ au scénario $Base_{\infty}$. Dans le tableau 5.18, la colonne 1 représente les coûts des différents scénarios tandis que la colonne 3 représente la taxe à l'enfouissement qui rendrait ces scénarios plus attrayants que $Base_{\infty}$.

TAB. 5.18 – $Base_*$: coûts et taxes

scénario	coût total (*1,000,000\$)	coût par logement (\$ /an/ logement)	taxe à l'enfouissement (\$ / tonne)
$Base_{\infty}$	309946.8	29.96	0.00
$Base_9$	320893.4	31.01	2.00
$Base_7$	348209.8	33.65	7.00
$Base_5$	379852.7	36.71	13.00
$Base_3$	429632.7	41.52	20.00
$Base_0$	536454.5	51.85	41.00

Normalement, favoriser un scénario par rapport à un autre ne devrait pas dépendre uniquement de la quantité totale enfouie. On doit aussi tenir compte de l'argent disponible et des impacts sur l'environnement. Il appartient aux décideurs d'évaluer si les impacts environnementaux encourus sont plus importants que le prix à payer pour les éviter.

Choix des combinaisons de collectes

Dans le scénario $Base_{\infty}$ les technologies existantes au CTED sont choisies en premier lieu : le centre de tri et le site d'enfouissement. Nous avons supposé que la capacité disponible pour accueillir les déchets ménagers soit de 50,000 t/an pour le centre de tri et 3,375,000 m^3 pour le site d'enfouissement. Ceci explique pourquoi durant les 10 premières années la combinaison de collectes choisie Q , comprend la collecte des contenants (*col_cont*), la collecte du carton (*col_cart*) et la collecte du papier (*col_pap*). En effet le site d'enfouissement du CTED étant encore utilisable, il est préférable d'utiliser au maximum la capacité existante du centre de tri et d'investir dans une technologie qui ne coûte pas cher : la *plate-forme-gravier*. Les contenants et le carton doivent être triés tandis que le papier est composté. Durant les dix dernières années la durée de vie du centre de tri serait dépassée et le site d'enfouissement utilisé à sa pleine capacité. La combinaison choisie A , comprend la collecte porte à porte *recy*, de toutes les matières recyclables. Elle permet de récupérer le plus de variétés de papier et de carton qui ont une valeur non négligeable sur le marché des matières recyclables.

Pour les autres scénarios, le tri étant une des solutions rentables qui permet de réduire l'enfouissement, la collecte *recy* est préférée. Dans le scénario $Base_9$ l'arrondissement 9 choisit la combinaison Q durant les deux premières périodes. Autrement, la combinaison de collectes A est choisie partout dans les scénarios $Base_9$ à $Base_3$. Pour le scénario $Base_0$, la combinaison choisie M , comprend la collecte porte à porte *recy* de toutes les matières recyclables, la collecte *col_cuis* des résidus de cuisine et les collectes des résidus de jardin : *col_herbe*, *col_branche* et *col_feuille*. Elle permet de collecter sélectivement le maximum de matières recyclables et de matières

organiques.

Choix des technologies

1. *Scénario Base_∞*

L'enfouissement est la classe de technologies privilégiée. On doit construire une technologie d'enfouissement au site M69 au début de la période 2. Au début de la période 3 ainsi qu'au début de la période 4, les deux sites d'enfouissement, CTED et M69, doivent être agrandis. La deuxième classe de technologies choisie est le tri. Au début de la période 3, on doit rénover et agrandir le centre de tri du CTED de façon à ce que toutes les matières recyclables récupérables à partir des sources soient triées. La troisième classe de technologies choisie est le compostage sélectif. Au début de la période 1, on doit construire une plate forme gravier au CTED. Les résidus du centre de tri venant de matières compostables sont compostées. Les autres résidus du centre de tri doivent être enfouis.

2. *Scénario Base₉*

Comme dans le scénario *Base_∞*, on doit construire deux sites d'enfouissement et une plate forme gravier. Cependant, dès la première période, le centre de tri doit être agrandi pour accueillir le maximum possible de récupération de matières recyclables. De plus, un incinérateur modulaire doit être construit au début de la période 4 au site M79.

3. *Scénario Base₇*

Contrairement aux scénarios *Base₉* et *Base_∞*, on n'est plus obligé de construire une technologie d'enfouissement au site M69 : l'agrandissement du site d'enfouissement du CTED suffit pour couvrir l'enfouissement des 4 périodes. On doit plutôt construire deux incinérateurs modulaires au début de la période 3 et construire une technologie de tri-compostage appelée *reservoir* au début de la période 4. L'incinération est utilisée à partir de la période 3 et il n'y a plus d'enfouissement direct à la période 4 : toutes les matières produites aux sources sont triées, compostées ou incinérées.

4. *Scénario Base₅*

On doit toujours agrandir le site d'enfouissement du CTED. Mais, comme l'incinération est la méthode qui permet de réduire le plus la quantité totale enfouie, on doit construire 3 incinérateurs modulaires. Un incinérateur modulaire doit être construit au début de la période 2, au site M10. Les deux autres doivent être construits au début de la période 3 aux sites M79 et M68. Comme la durée de vie d'un incinérateur modulaire ne dépasse pas 2 périodes, l'incinérateur modulaire construit au site M10 au début de la période 2 doit être rénové au début de la période 4. À partir de la période 3, il n'y a plus d'enfouissement direct : les matières produites aux sources sont triées ou incinérées.

5. *Scénario Base₃*

Puisque la limite sur l'enfouissement est fixée à $3,000,000 \text{ m}^3$ et que la capacité actuelle de la technologie d'enfouissement construite au CTED est égale à $3,375,000 \text{ m}^3$, on n'a plus besoin d'investir dans la technologie d'enfouissement. On doit construire des incinérateurs modulaires dès la période 1. Un incinérateur est construit au début de la période 1 et doit être rénové au début de la période 3. Deux autres incinérateurs sont construits au début de la période 2 et doivent être rénovés au début de la période 4. L'incinération commence au début de la période 1 et l'enfouissement direct est banni dès la période 2.

6. *Scénario Base₀*

On doit construire 3 incinérateurs modulaires au début de la période 1 et les rénover au début de la période 3. Durant toutes les périodes les matières produites aux sources sont triées, compostées ou incinérées. Les matières organiques récupérables au moyen des collectes sélectives sont compostées. Les seules matières enfouies sont les cendres produites par l'incinération et les rejets de verres venant du centre de tri. Les autres résidus du centre de tri sont compostés ou incinérés.

Pour les différents scénarios du groupe *Base**, la figure 5.2 montre la quantité moyenne de matières triées, incinérées ou compostées annuellement ainsi que la moyenne de l'enfouissement direct et de l'enfouissement des résidus.

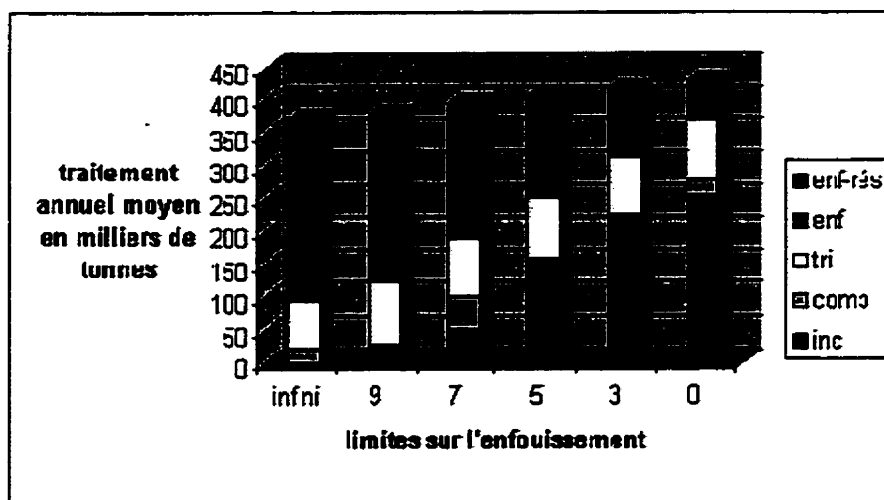


Figure 5.2 – *Base_{*}* : traitement annuel moyen

Nous remarquons que minimiser les coûts sans limiter la quantité totale enfouie revient à favoriser la filière d'enfouissement direct. Cette filière est la moins coûteuse lorsqu'on additionne les coûts d'investissements, les coûts de maintenance et d'opération et les coûts de collecte. Nous constatons que réduire l'enfouissement total revient à introduire progressivement l'incinération. L'incinération étant une technologie souvent contestée par la population, nous analysons maintenant des solutions qui permettraient de réduire l'enfouissement tout en excluant l'incinération.

5.3.2 Les scénarios *Inc_{*}*

Les coûts

La solution optimale du scénario *Inc_∞* est la même que celle obtenue dans le scénario *Base_∞* car dans cette solution les incinérateurs n'étaient pas sélectionnés.

Les quantités enfouies dans les scénarios $Inc_i : i \in \{9, 7, 5, 3, 0\}$ représentent des réductions de 10, 30, 50, 70 et 80% de la quantité enfouie dans le scénario Inc_∞ . Le coût additionnel de chacun de ces scénarios par rapport au coût total de Inc_∞ est respectivement de 12, 40, 74, 126, 160 millions de dollars. Le niveau minimal d'enfouissement est plus élevé celui atteint au scénario $Base_0$ car les rejets des technologies de tri-compostage sont considérables, comparés aux cendres produites par l'incinération. La courbe 5.3 représente la fonction convexe du coût total du système (en ordonnée) par rapport à la réduction de la quantité totale enfouie (en abscisse). Les unités utilisées sont des millions de m^3 pour l'enfouissement et des millions de dollars pour le coût. Les six scénarios Inc_* subdivisent en cinq segments l'intervalle des valeurs possibles de l'enfouissement. La longueur totale de cet intervalle est de 8 millions de m^3 tandis que les longueurs respectives des segments sont de 1, 2, 2, 2 et 1 millions de m^3 . Dans les différentes subdivisions, le coût unitaire de réduction d'un m^3 enfoui est respectivement de 12, 14, 17, 26, 33 \$. Le niveau minimal d'enfouissement est de 1,957,000 m^3 au coût total de 470,062,100 \$.

Le tableau 5.19 montre les coûts annuels par logement pour les différents scénarios, ainsi que les taxes à l'enfouissement qui favoriseraient ces scénarios par rapport au scénario de Inc_∞ . Nous rappelons que les coûts et les taxes ne sont évalués que pour la première année de planification et peuvent être ajustés pour les autres années et pour les périodes.

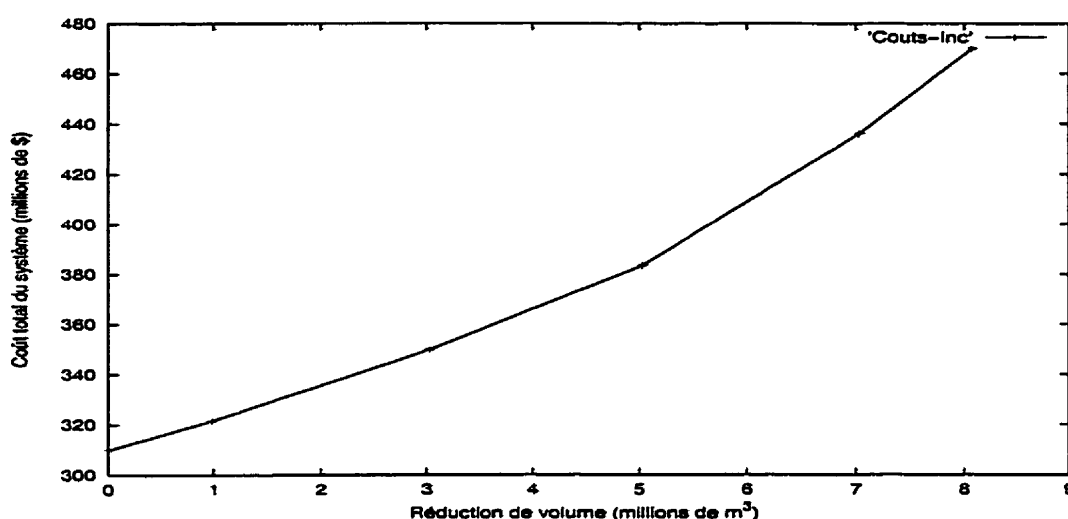


Figure 5.3 – Inc_* : le coût total en fonction de la réduction de l'enfouissement

TAB. 5.19 – Inc_* : coûts et taxes

scénario	coût total (*1000 \$)	coût par logement (\$ /an/ logement)	taxe à l'enfouissement (\$ / tonne)
Inc_{∞}	309946.8	29.96	0.00
Inc_9	321620.0	31.11	2.12
Inc_7	349857.8	33.83	7.22
Inc_5	383468.1	37.09	13.30
Inc_3	436151.8	42.20	22.85
Inc_0	470062.1	45.47	29.00

Choix de combinaisons de collectes

Les choix des combinaisons de collectes dans les scénarios Inc_i : $i \in \{\infty, 9, 7, 5, 3\}$ ne diffèrent pas de ceux rencontrés dans les scénarios $Base_i$: $i \in \{\infty, 9, 7, 5, 3\}$, et les motivations de ces choix sont similaires. Par contre, contrairement au scénario

$Base_0$, la combinaison A comprenant uniquement la collecte *recy* des matières recyclables est choisie dans le scénario Inc_0 à la place de la combinaison M impliquant aussi les collectes des matières organiques. En effet, pour utiliser les technologies de tri-compostage on n'a pas besoin de collecter sélectivement les matières organiques.

Choix des technologies

Les filières de traitement choisies durant toutes les périodes sont : le tri, le compostage et l'enfouissement. Comme on l'a mentionné plus haut la solution optimale du scénario Inc_∞ est identique à celle du scénario $Base_\infty$. Pour les autres scénarios, la technologie *réservoir* de tri-compostage permet de respecter les contraintes sur le niveau d'enfouissement. Cette technologie doit être construite au CTED, car ce site minimise les distances à partir des sources. La différence entre les scénarios $Inc_i : i \in \{9, 7, 5, 3, 0\}$ est marquée par la période de construction initiale de la technologie *réservoir*, le pourcentage de matières produites aux sources traitées par cette méthode (directement après la construction initiale) et la période d'arrêt de l'enfouissement direct. Ces résultats sont rassemblés à l'intérieur du tableau 5.3.2. Remarquons que lors de l'arrêt de l'enfouissement direct, 26 % de matières peuvent être traitées par le centre de tri et par conséquent, la technologie *réservoir* accueille annuellement 74 % de matières produites aux sources. Seulement les résidus non compostables du centre de tri et les résidus du tri-compostage seront enfouis.

TAB. 5.20 – Inc_* : Activité du tri-compostage et arrêt de l'enfouissement

scénario	réservoir		arrêt
	début	matières traitées	enfouissement
Inc_9	période 4	31%	-
Inc_7	période 3	33%	période 4
Inc_5	période 2	33%	période 3
Inc_3	période 1	33%	période 2
Inc_0	période 1	74%	période 1

La figure 5.4 montre la quantité moyenne de matières compostées, triées, enfouies directement ou indirectement, pour les différents scénarios du groupe *Inc.*. On voit que pour limiter la quantité totale enfouie on doit recourir au compostage qui remplace graduellement l'enfouissement. Les technologies choisies sont les technologies de tri-compostage. Comme les résidus du tri-compostage doivent être enfouis, la quantité totale de déchets traités à travers tout le système augmente en fonction de l'activité des technologies de tri-compostage. En considérant la réduction de la quantité totale enfouie, les technologies de tri-compostage permettent d'obtenir des résultats comparables à ceux donnés par l'utilisation d'incinérateurs. Cependant, nous croyons qu'il serait plus facile de contrôler la qualité du compost lorsque le tri des matières compostables est fait à la source car dans ce cas on limite les risques de contamination. Ceci nous a conduit à analyser les solutions possibles qui limiteraient l'enfouissement dans l'hypothèse que le compostage sélectif serait préféré au tri-compostage.

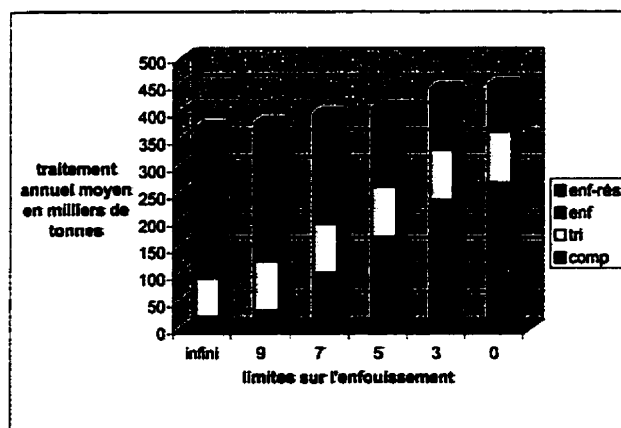


Figure 5.4 – *Inc.* : traitement annuel moyen

5.3.3 Les scénarios $IncTc_*$

Lorsque les seules classes de technologies considérées sont le compostage sélectif, le tri et l'enfouissement, la quantité enfouie ne peut être moins que $9,510,600 \text{ m}^3$. Le groupe de scénarios $IncTc_*$ comprend seulement deux scénarios : $IncTc_\infty$ et $IncTc_0$. Les autres niveaux d'enfouissement définis dans le tableau 5.17 sont impossibles à atteindre sans modification de la base de données. Par exemple si on supposait que la participation aux collectes des matières organiques est de 70% au lieu de 30%, la quantité minimale pouvant être enfouie serait réduite à $9,042,300 \text{ m}^3$.

Les coûts

La solution optimale de $IncTc_\infty$ est identique à celle obtenue dans le scénario $Base_\infty$ car dans ce scénario, le tri-compostage et l'incinération n'étaient pas choisis. Le niveau d'enfouissement atteint dans le scénario $IncTc_0$ correspond à une réduction de 5 % de la quantité totale enfouie dans le scénario $IncTc_\infty$. Le coût additionnel à payer s'évalue à 63 millions de dollars, soit un coût unitaire de 120 \$ par m^3 réduit. La figure 5.5 montre le segment de droite représentant la fonction reliant le coût total du système à la réduction du volume total enfoui.

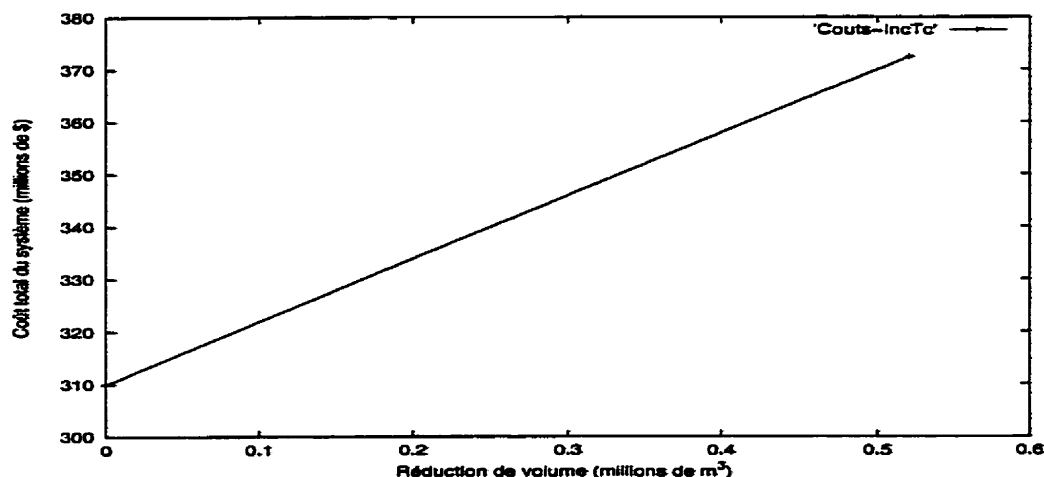


Figure 5.5 – $IncTc_*$: le coût total en fonction de la réduction de l'enfouissement

le coût annuel par logement pour le scénario $IncTc_0$ est de 36 \$. La taxe à l'enfouissement qui favorise ce scénario par rapport à $IncTc_\infty$ s'élève à 12 \$.

Choix de combinaisons de collectes

Le seul moyen dont on dispose pour réduire la quantité totale enfouie consiste à récupérer le plus de matières au moyen des collectes sélectives. La combinaison de collectes sélectives M est choisie pendant toutes les périodes. Elle comprend la collecte porte à porte *recy* de toutes les matières recyclables, la collecte *col_cuis* des résidus de cuisine et les trois collectes de résidus de jardin : *col_herbe*, *col_feuille* et *col_branche*.

Choix de technologies

Dans le scénario $IncTc_0$, le centre de tri doit être agrandi dès la première période, pour traiter toutes les matières recyclables récupérables à partir des sources. Comme on veut minimiser l'enfouissement, on doit maximiser la quantité ramassée par les collectes sélectives. Cependant cette quantité dépend des taux de saisie des matières et des taux de participation aux collectes sélectives. Comme résultat, seulement 26% de matières produites aux sources annuellement sont triées et seulement 5% sont compostées directement.

La quantité détournée de l'enfouissement en utilisant uniquement les technologies de tri et de compostage sélectif n'est pas comparable à la quantité détournée lorsqu'on introduit ou bien les incinérateurs ou bien les technologies de tri compostage. En effet avec le tri et le compostage sélectif, on est juste à même de détourner 31% de matières produites annuellement, tandis qu'avec les incinérateurs et/ou les technologies de tri-compostage on est à même de détourner toutes les matières produites annuellement.

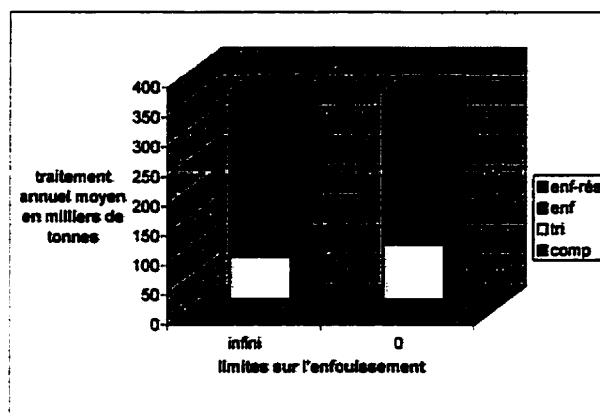


Figure 5.6 – $IncTc_*$: traitement annuel moyen

5.3.4 Les scénarios Env_*

Une façon indirecte de réduire l'enfouissement est d'imposer une limite inférieure de -1 sur les indices environnementaux globaux. On interdit ainsi d'investir dans l'enfouissement car pour tous les sites, l'indice environnemental associé à l'enfouissement ne dépasse pas -1. Comme résultat, sans devoir introduire explicitement une contrainte sur l'enfouissement, le scénario Env_∞ permet une réduction de 58 % par rapport à la quantité enfouie dans le scénario $Base_\infty$. Pour cette raison, le groupe Env_* ne comprend que trois scénarios : Env_∞ , Env_3 et Env_0 .

Les coûts

La quantité totale enfouie dans le scénario Env_∞ est de $4,231,900 \text{ m}^3$ et le coût total du système est de 420,461,400 dollars. La réduction d'un million de m^3 par rapport à la quantité enfouie dans le scénario Env_∞ occasionne un coût additionnel de 45 millions de dollars : soit un coût unitaire de 45 \$ par m^3 réduit. Par contre, pour réduire de deux millions de m^3 la quantité enfouie dans le scénario Env_3 on doit payer 150 millions de dollars : soit un coût unitaire de 75 \$ par m^3 réduit. On obtient une fonction convexe représentée par la courbe 5.7 où les unités respectives sont des millions de dollars et des millions de m^3 . Le coût annuel par logement pour les scénarios $Env_i, i \in \{\infty, 3, 0\}$ s'évalue respectivement à 41 \$, 45 \$ et 58 \$.

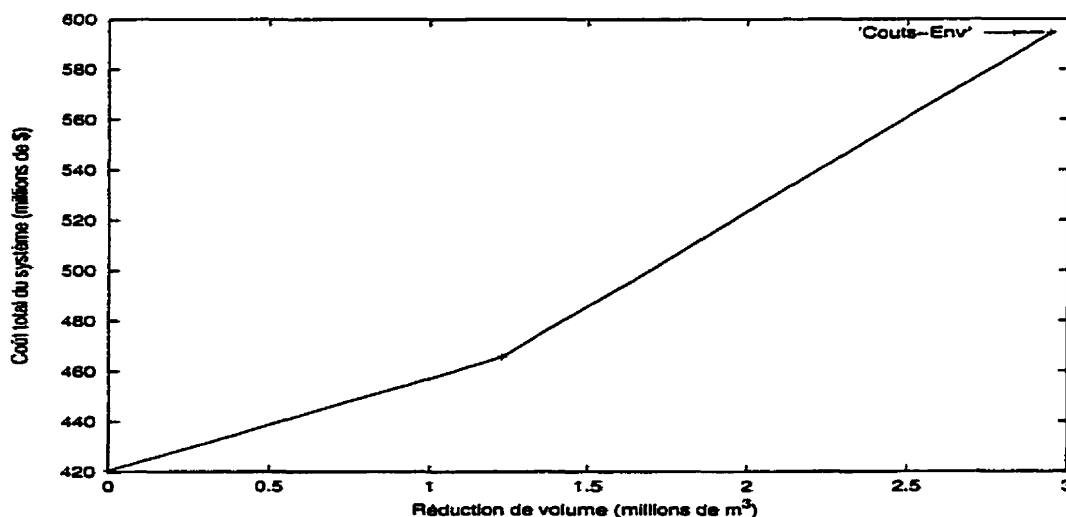


Figure 5.7 – Env_* : le coût total en fonction de la réduction de l'enfouissement

Choix des combinaisons de collecte

La combinaison A, choisie dans les scénarios Env_∞ et Env_3 , comprend la collecte porte à porte *recy* des matières recyclables. Pour le scénario Env_0 , la combinaison M est choisie. Elle comprend la collecte porte à porte *recy* des matières recyclables, la collecte des résidus de cuisine et les collectes des résidus de jardin.

Choix de technologies

1. *Scénario Env_∞*

Un incinérateur modulaire doit être construit au début de la période 1 au site M10. On doit construire également la technologie *tunnel* de compostage sélectif au CTED et agrandir le centre de tri du CTED. Au début de la période 3, la quantité à incinérer devient importante. Contrairement aux scénarios *Base_{*}*, au lieu de construire plusieurs incinérateurs modulaires, on remplace l'incinérateur modulaire construit au début de la période 1 par un incinérateur de masse.

Durant les 2 premières périodes, 26% des matières produites annuellement aux sources sont triées, 23% sont incinérées et seulement 51% sont enfouies directement. Au cours des deux dernières périodes, il n'y a plus d'enfouissement direct : 26% des matières produites annuellement sont triées et 74% sont incinérées. La technologie de compostage sélectif est utilisée uniquement pour traiter les résidus compostables du centre de tri.

2. *Scénario Env₃*

Une nouvelle technologie s'ajoute aux choix technologiques du scénario *Env_∞* : *cylindre-rotatif* qui est une technologie de tri-compostage. On suppose qu'une technologie comprend au maximum 4 cylindres d'où une capacité maximale de 16,000 t/an. Pour cette raison et pour avoir une capacité suffisante on aura besoin de construire 4 de ces technologies au début de la période 1.

Durant les deux premières périodes, la quantité triée annuellement constitue 26% des matières produites. Un peu moins que 17% des matières produites aux sources sont compostées, un peu moins que 31% sont incinérées et seulement 27 % doivent être enfouies directement. Durant les périodes 3 et 4, il n'y a plus d'enfouissement direct. La quantité incinérée atteint 57% des matières produites annuellement.

3. *Scénario Env₀*

Le tri-compostage n'est plus choisi. Toutes les matières non collectées sélectivement doivent être incinérées. Les matières organiques recueillies par les collectes sélectives représentent 5 % de matières produites annuellement. Elles doivent être traitées par une technologie de compostage sélectif. D'une part, l'incinérateur de masse doit être construit dès la première période. D'autre part la

technologie de compostage sélective *tunnel* qui était choisie dans les scénarios Env_3 et Env_∞ est remplacée par la technologie *couloir*. En effet, en comparant les coûts d'investissement des 2 types de technologies, le coût fixe des technologies *tunnel* est relativement moins élevé, mais leur coût variable est relativement plus élevé. Ceci explique pourquoi pour de petites capacités on doit choisir les technologies *tunnel* tandis que pour des capacités plus ou moins grandes on choisit les technologies *couloir*.

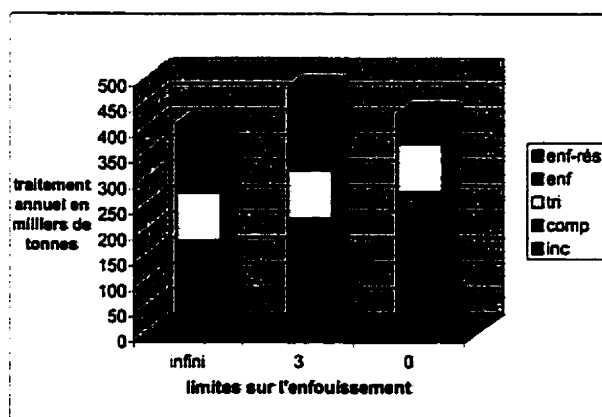


Figure 5.8 – Env_* : traitement annuel moyen

5.3.5 Discussion des résultats

Dans cette section nous avons analysé, à l'intérieur de chacun des 4 groupes de scénarios, l'influence des contraintes d'enfouissement sur le choix technologique et sur le coût total du système. En guise de conclusion, nous allons comparer les scénarios issus de groupes distincts. Nous commençons par comparer les différents groupes au point de vue *coût, choix technologique et réduction de l'enfouissement*. Nous ferons ensuite une analyse environnementale des technologies impliquées dans les scénarios composant ces groupes.

Nous remarquons qu'en réduisant l'ensemble de technologies et/ou de sites disponibles pour les investissements, le coût à payer pour réduire l'enfouissement augmente. La figure 5.9 montre la correspondance entre la quantité totale enfouie (en abscisse) et le coût du système (en ordonnée) pour les différents scénarios. Les unités utilisées respectivement pour les coûts et pour la quantité enfouie sont *les milliers de dollars* et *les milliers de mètre cubes*.

La solution la plus économique en terme de coûts est obtenue à partir du scénario de $Base_{\infty}$. Les technologies privilégiées dans cette solution sont le tri et l'enfouissement. Malgré les coûts occasionnés par les collectes sélectives, nous constatons que les prix des matières recyclables aux marchés font que le tri est plus économique que l'enfouissement. Seulement, la quantité totale triée dépend du taux de saisie des matières recyclables et de la participation des citoyens aux collectes sélectives. Ceci fait que dans le scénario de base, au moins 74% de matières produites annuellement aux sources doivent être enfouies.

Le tri-compostage et l'incinération ne font pas partie de la solution optimale en raison de leurs coûts d'investissement très élevés. Lorsqu'on introduit des contraintes sur la quantité totale enfouie, l'incinération apparaît graduellement et remplace l'enfouissement. Les technologies d'incinération choisies sont les *incinérateurs modulaires*.

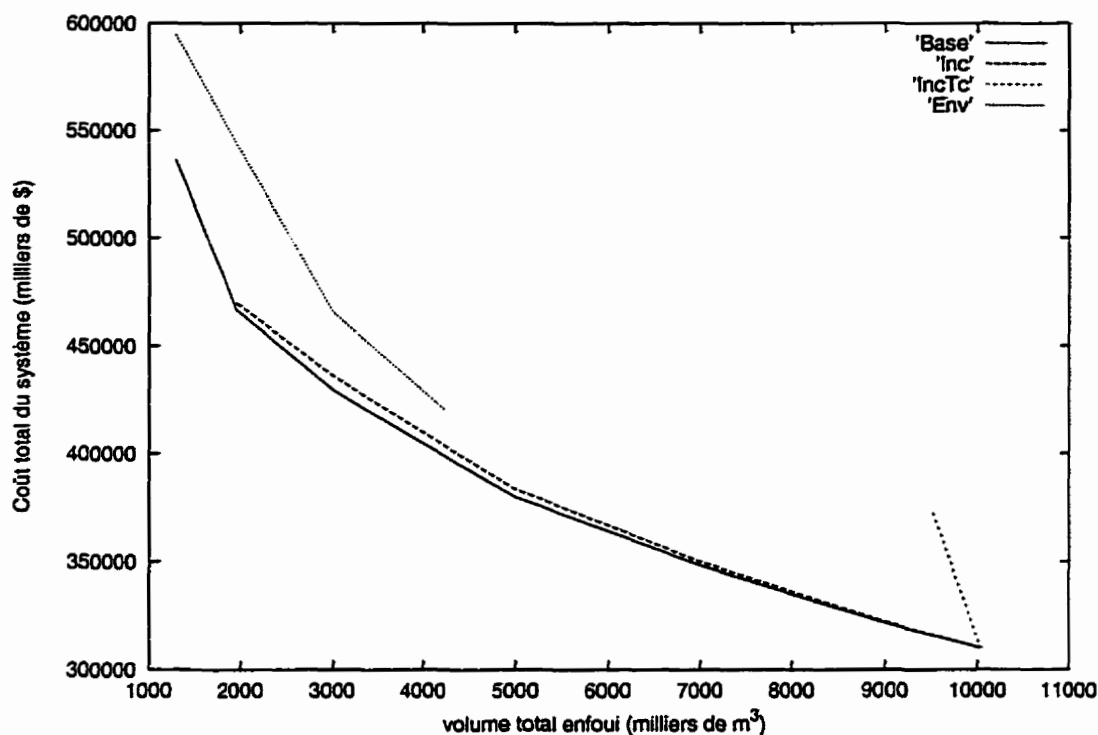


Figure 5.9 – Synthèse : Fonctions reliant coûts et enfouissement

Lorsqu'on interdit l'incinération, on doit recourir au tri-compostage pour réduire l'enfouissement. Les résultats obtenus à partir des technologies de tri-compostage, à savoir les coûts à payer et la quantité de matières détournées de l'enfouissement, ne sont pas très distants de ceux obtenus en utilisant l'incinération. La technologie de tri-compostage choisie est appelée *réservoir*.

Il est impossible de détourner de l'enfouissement toutes les matières produites aux sources, sans recourir à l'incinération ou au tri-compostage. Lorsque les seules technologies utilisées sont le tri et le compostage sélective, le taux de matières non enfouies directement ne peut pas dépasser 31%. La technologie de compostage sélectif choisie est la *plate-forme-gravier*.

L'incinération, même si elle permet une réduction maximale de la quantité enfouie, reste mal perçue par la plupart des gens. Le critère social étant une partie

intégrante des impacts environnementaux étudiés par Vaillancourt [48], dans le scénario 4 au lieu d'exclure des classes entières de technologies nous avons utilisé les indices environnementaux globaux pour exclure certaines affectations de technologies aux sites. Comme le montre la figure 5.9, en éliminant toutes les combinaisons (site, technologie) pour lesquelles l'indice environnemental ne dépasse pas -1, on doit payer très cher. Néanmoins, comme certains incinérateurs font partie de l'ensemble des solutions réalisables, on peut atteindre l'objectif d'enfouissement minimal. Dans toutes les classes, les technologies choisies diffèrent de celles choisies auparavant selon un critère purement économique. Respectivement dans les classes *incinération*, *tri-compostage* et *compostage sélectif*, on choisit les technologies *incinérateur de masse*, *cylindre rotatif* et *couloir*.

Pour l'analyse environnementale, nous utilisons deux critères de comparaison dont le premier se rapporte à l'indice environnemental global de chaque investissement. Le second se rapporte à la somme des indices globaux des technologies existantes en chaque période. Nous appelons cette somme *l'indice global par période*. Deux paramètres sont utilisés : λ_1 et λ_2 .

λ_1 : désigne le minimum des indices globaux des investissements;

λ_2 : désigne le minimum des indices globaux par période.

Ces paramètres sont calculés pour les 14 scénarios définis dans cette section. Ils sont donnés au tableau 5.3.5. Nous omettons de parler des scénarios Inc_∞ et $IncTc_\infty$ car leurs solutions sont équivalentes à la solution de $Base_\infty$.

Les scénarios *Env.* donnent les meilleures valeurs de λ_1 , soit -0.96 et -0.98. Elles correspondent respectivement à la localisation d'un incinérateur modulaire au site M10 ou la localisation de la technologie *couloir* au CTED. Dans les autres scénarios, on se rend compte qu'en interdisant les investissements dans l'enfouissement, la valeur de λ_1 se trouve améliorée. En effet l'investissement le moins cher consiste en l'agrandissement du site d'enfouissement au CTED, qui correspond à un indice

TAB. 5.21 – Comparaison de paramètres environnementaux

scénario	enfouissement (*1,000,000 m^3)	λ_1	λ_2
$Base_{\infty}$	10.03	-1.26	-4.42
$IncTc_0$	9.51	-1.26	-4.42
$Base_9$	9.04	-1.26	-6.61
Inc_9	9.04	-1.26	-5.53
$Base_7$	7.00	-1.26	-7.62
Inc_7	7.00	-1.26	-5.58
$Base_5$	5.00	-1.26	-7.42
Inc_5	5.00	-1.26	-4.37
Env_{∞}	4.23	-0.96	-5.02
$Base_3$	3.00	-1.14	-7.47
Inc_3	3.00	-1.22	-4.37
Env_3	3.00	-0.96	-8.67
Inc_0	1.97	-1.22	-4.37
$Base_0$	1.29	-1.14	-7.47
Env_0	1.29	-0.98	-5.13

environnemental de -1.26 . Lorsque la limite maximale d'enfouissement ne doit pas dépasser la capacité initiale, les pires valeurs de λ_1 sont -1.14 et -1.22 . Elles correspondent respectivement à la localisation d'un incinérateur modulaire au site M79 et à la localisation de la technologie réservoir au CTED.

Les éléments d'analyse de nos scénarios ont essentiellement porté sur la quantité totale enfouie et l'impact individuel de chaque affectation site-technologie. Ces facteurs, quoiqu'évidemment importants, ne sont pas les seuls sur lesquels une analyse peut porter. Par exemple certains impacts environnementaux, comme l'impact visuel, l'impact sur l'aménagement et sur le développement du territoire sont liés aux impacts individuels des technologies mais surtout au nombre de technologies existantes à chaque période. Le paramètre λ_2 permet de tenir compte des deux facteurs. Pour chaque scénario, λ_2 est le minimum de la somme des indices des technologies présentes à chaque période. La valeur de λ_2 est égale à -4.42 dans le scénario $Base_{\infty}$.

car à partir de la période 2, on a à la fois deux sites d'enfouissement, une plate-forme-gravier et un centre de tri. Dans les scénarios $Inc_i : i \in \{5, 3, 0\}$ la valeur de λ_2 s'améliore car le deuxième site d'enfouissement est remplacé par la technologie *réservoir* et que la localisation de la plate-forme-gravier devient M65 au lieu du CTED. La solution optimale du scénario Env_3 donne la pire valeur de λ_2 . Elle comporte 9 technologies dont 4 technologies de tri-compostage, une technologie de compostage sélectif, un incinérateur, le centre de tri du CTED, le site d'enfouissement du CTED et le site d'enfouissement *Demix*. Il serait intéressant d'explorer des scénarios permettant d'améliorer les paramètres λ_2 . Ces scénarios seraient définis soit à partir des limites sur le nombre total d'installations existantes par classe ou à partir des limites sur les indices environnementaux par période. En fait, la construction et l'analyse des futurs scénarios seront dictées par les besoins des utilisateurs. Comme ces besoins sont grands, le nombre de scénarios possibles est très grand.

CONCLUSION

Dans cette thèse, un modèle dynamique de programmation linéaire mixte permettant de planifier une gestion intégrée de déchets est présenté. L'une des étapes importantes de la planification consiste en l'élaboration d'un calendrier des expansions de capacité des technologies de traitement et d'élimination. Pour chaque période, le modèle fournit la capacité et l'activité de chaque technologie à chaque site. Les spécificités des communautés telles que la composition des déchets produits et les moyens de récupération disponibles sont intégrées. Plusieurs modes de collecte peuvent être comparés et le modèle détermine les modes de collecte choisis en chaque période pour chaque source. Des contraintes de bilan sont définies pour quantifier avec précision les matières et l'énergie produites par les unités de traitement, suivant la nature et la quantité des matières traitées. La modélisation tient compte des technologies utilisant plusieurs modes opératoires. Ceci permet de tenir compte des technologies comme le compostage et le recyclage, pour lesquelles un produit fini est le résultat d'un mélange de différents types de matières. Les investissements pour l'introduction de nouveaux modes de collecte et la construction de nouvelles technologies sont considérés. Dans la recherche de la solution optimale, les coûts de sensibilisation et d'achat de matériaux pour les modes de collecte, les coûts de collecte, de transport, de traitement et de nouvelles constructions et leurs valeurs de rachat ainsi que les prix des matières aux marchés sont analysés conjointement. Même si l'objectif principal est la minimisation des coûts, grâce aux contraintes environnementales, il est possible de choisir le niveau d'enfouissement et de limiter les impacts environnementaux. Le modèle est adaptable à tous les types de données. Il permet d'évaluer toutes les étapes de la gestion intégrée de déchets.

Nous utilisons le langage de modélisation *AMPL PLUS*. Le logiciel *CPLEX* est utilisé pour la résolution. Les paramètres de résolution sont choisis suivant les spécificités du modèle à partir d'un certain nombre de tests utilisant le problème planification de la gestion de déchets dans la ville de Montréal. Deux coupes de réalisabilité sont définies et nous permettent d'améliorer le temps de résolution. Nous

établissons également une hiérarchie dans l'ensemble des variables binaires et le temps de résolution se trouve davantage amélioré.

Le modèle doit être utilisé de façon itérative par le décideur pour évaluer un certain nombre de scénarios alternatifs. En effet, certains jugements n'étant pas quantifiables, il serait difficile de trouver une solution à toutes les alternatives. Le modèle donne la solution optimale de chaque scénario bien défini et le décideur tire des conclusions utiles en comparant les solutions issues de ces scénarios. Nous analysons un certain nombre de stratégies qui permettraient de réduire l'enfouissement dans la ville de Montréal. Nous constatons que la solution optimale du scénario de base comprend surtout l'enfouissement et le recyclage. Des scénarios fixant le niveau d'enfouissement, l'ensemble des technologies disponibles et les limites sur les impacts environnementaux sont analysés. D'autres scénarios sont envisageables et l'analyse des résultats permettrait aux dirigeants de la ville de Montréal de prendre des décisions éclairées concernant l'implantation des collectes sélectives et la construction de technologies de traitement.

Malgré les résultats encourageants obtenus aussi bien sur le plan de la modélisation que sur l'apport pratique, beaucoup de travail reste à faire. Au point de vue *pratique*, il serait intéressant d'appliquer le modèle aux données de d'autres régions. Il peut servir à la planification de la gestion de déchets aussi bien au niveau local que régional. Des efforts de *modélisations* devraient être fournis afin d'incorporer de nouveaux facteurs tels que : la fonction définissant les lois de participation aux collectes sélectives en fonction des incitatifs financiers ainsi que la fonction définissant les lois des demandes et des prix aux marchés. Au point de vue *algorithmique*, le modèle se réduisant à un problème de programmation linéaire mixte, le temps de résolution augmente généralement de façon exponentielle en fonction du nombre de variables binaires. Nous devons nous assurer que l'ajout de nouvelles contraintes au modèle ne dégrade pas significativement le temps de résolution. S'il y a lieux, nous devrions déterminer de nouvelles coupes de réalisabilité ou encore développer des heuristiques spécialisées pour notre problème.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ALTER H. (1991). "The future course of solid waste management in the U.S.", Waste management and research 9, 3-20.
- [2] BAETZ BRIAN W. and NEEBE ALAN W. (1994). "A planning model for development of waste material recycling programmes", European Journal of Operational Research Society Ltd, vol. 45, no 12, 1374-1384.
- [3] BEN ABDALLAH, M. (1997). Les marchés des matières secondaires au sein d'une gestion intégrée de déchets. Mémoire de maîtrise, École des Hautes Études commerciales, Montréal, Canada.
- [4] BARTONE CARL R. (1991). "Institutional and management approaches to solid waste disposal in large metropolitan areas", Waste management and research 9, 525-536.
- [5] BERGER C., SAVARD G. and WIZERE A. (1998). "EUGENE : An optimization model for integrated regional solid waste management planning", International Journal of Environment and Pollution.
- [6] BLOEMHOF-RUWAARD JACQUELINE M., SALOMON MARC and WASENHOF LUK N. VAN (1996). "The capacitated distribution and waste disposal problem", European journal of operational research 88(3).
- [7] BÖTCHER H. and REMBOLD G. H. (1977). "Optimization model for a regional system of solid-waste and wastewater disposal which considers legal pollution", Environnement and Planning A 9, 771-786.
- [8] CARUSO C., COLORNI A. and PARUCCINI A., "The regional urban solid waste management system : A modelling approach",

European Journal of Operational Research **70**, 16-30.

- [9] CHANG NI-BIN, SHULER RICHARD E. and SHOEMAKER CHRISTINE A. (1993). "Environment and economic optimization of an integrated solid waste management system", The journal of resource management and technology **21**.
- [10] CHANG NI-BIN, WANG S. F. (1993). "Allocation model site selection of solid waste management facilities with traffic congestion constraints", Civil Engineering Systems **11**, 287-306.
- [11] CHANG NI-BIN, WANG S. F. (1996). "Waste management analysis by multiobjective mixed integer programming model", Journal of Environmental Management **48**, 17-43.
- [12] CHANG NI-BIN, LIN Y. T. (1997). "Optimal Siting of transfer station locations in a metropolitan solid waste management system", Journal of environmental science & Health, A **32**(8).
- [13] COMMUNAUTE URBAINE de MONTRÉAL (1994). Rapport de travail du groupe de travail sur la gestion intégrée des déchets et matières récupérables.
- [14] CPLEX OPTIMIZATION, INC. (1997). *Using CPLEX Callable Library and CPLEX Mixed Integer Library*.
- [15] COMMUNAUTE URBAINE de MONTRÉAL (1995). La réduction à la source, le réemploi et le recyclage des déchets solides urbains sur le territoire de la communauté urbaine de Montréal. Rapport de la table de collaboration.
- [16] ERKUT E. and NEUMAN S. (1989). "Analytical models for locating undesirable facilities", European Journal of Operational Research, **40**, 275-291.

- [17] EVERETT JESS W., MODAK ABHIJIT R. and JACOBS TIMOTHY (1993). "Optimal scheduling of composting, recycling, and land-fill operations in an integrated solid waste management system", Journal of Resource management and technology **21**(3).
- [18] EVERETT JESS W. and MODAK ABHIJIT R. (1996). "Optimal regional scheduling of solid waste systems. I : Model development", Journal of Environmental engineering **122** (9).
- [19] FISCHBONE LESLIE and ABILOCK HALORD (1981). "Markal, A Linear-programming model for energy systems analysis : Technical description of BNL version", Energy Research, vol.5 353-375.
- [20] FUERTES LOUIS A., HUDSON JAMES F. and MARKS DAVID H. (1974). "Solid waste management : Equity trade-off Models", Journal of the urban planning and development division.
- [21] GEOFFRION A.M., DYE J.S and FEINBERG A. (1972). " An interactive approach for multi-criterion optimization, with an application to the operation of an academic department", Management science, vol.19, 357-368.
- [22] GOTTINGER HANS W. (1986). "A computational model for solid waste management with application", Appl. Math. Modeling, vol.10, 330-338.
- [23] GOTTINGER HANS W. (1988). "A computational model for solid waste management with application", European Journal of Operational Research **35**, 350-364.
- [24] GOTTINGER HANS WERNER (1991). Economic models and applications of solid waste management.
- [25] GROUPE DE RECHERCHE ET D'ANALYSE INTERDISCIPLINAIRE EN GESTION DE L'ENVIRONNEMENT (G.R.A.I.G.E.),

Production et traitement des déchets domestiques à Montréal, 1989.

- [26] HARVEY D. J. and O'FLAHERTY T.G. (1973). "Analysing of solid waste transportation and disposal alternatives", Infor 3.
- [27] JENKINS LARRY (1986). "Optimal capacity of recovering resources from municipal solid waste when demand for recovered material is uncertain", Modeling and simulation Conference, Pittsburgh.
- [28] KAILA JUHA (1987). "Mathematical model for strategy evaluation of municipal solid waste management systems", Technical Research Center of Finland, publication 40.
- [29] KAHN ARSHAD M., "Solid-waste disposal with intermediate transfer stations : An application of the fixed-charge location problem", Operational Research Society, vol. 38, No. 1,31-37 (1987).
- [30] KIRCA ÖMER and NESIM ERKIP (1988). "Selecting transfer station locations for large solid waste systems", European Journal of Operational Research 38, 339-349.
- [31] KREITH FRANK (1994). *Handbook of Solid Waste Management*.
- [32] KRIKKE H. R., HARTEN A. VAN and SCHUUR P. C. (1998). "Mixed policies for recovery and disposal of multiple-tupe consumer products", Journal of environmental engineering 124 (4).
- [33] LINDEROTH, J. T. and SAVELSBERGH M. W. P. (1997). A computation Study of Search Strategy for Mixed Integer Programming, October.
- [34] LIVE, N. (1997). Modélisation des technologies de traitement et d'élimination dans un système de gestion intégrée de déchets. Mémoire de maîtrise, Ecole

Polytechnique de Montréal, Canada.

- [35] LUND R. (1990). "Least-cost scheduling of solid waste recycling", Journal of Environmental Engineering **116**(1).
- [36] MARKS DAVID H. and LIEBMAN JON C. (1971). "Location models : Solid waste collection example", Urban Planning and Development Division **97**, 339-349.
- [37] NEMHAUSER GEORGE L. et WOLSEY LAURENCE A. (1988). Integer and Combinatorial Optimisation.
- [38] OSSENBRUGGEN PAUL J. and OSSENBRUGGEN PAUL C. (1993). "Environment and economic optimization of an integrated solid waste management system", The journal of resource management and technology **21**.
- [39] PRESCOD M.B. (1991). Urban solid waste management.
- [40] RATEL, M. (1998). Gestion intégrée de déchets sur le territoire de la ville de Montréal : Analyse de la filière de compostage, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Canada.
- [41] SOUCY, M. (1997). Modélisation des sources génératrices et des types de collecte liés à un système de gestion intégrée de déchets. Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada.
- [42] SHEKDAR A. V., KRISHNASWAMY K. N. (1991). "Long-term planning for solid waste management in India", Waste management and Research, **9**, 511-523.
- [43] SHEKDAR A. V., KRISHNASWAMY K. N., Tikedar V. G., Bhide A. D. (1992). "Indian urban solid waste management systems", Waste management,

vol. 12, 379-387.

- [44] STUER RAPH E. (1977). "Multiple objective linear programming with interval criterion weight", Management science, vol.23, 305-316.
- [45] SUNDEBERG J., GIPPERTH P. and WENE C.-O. (1996). A systems approach to municipal solid waste management : a pilot study of Goteborg, Energy Systems Technology Division, Department of Energy Conversion. Chalmers University of Technology, S-412 96 Goteborb, Sweden.
- [46] TAHA HAMDY A. (1975). Integer Programming : theory, applications and computations.
- [47] TCHOBANOGLIOUS GEORGE, THEISEN HILARY, VIGIL SAMUEL (1993). Integrated solid waste management : Engineering Principles and management Issues.
- [48] VAILLANCOURT K. (1998). Évaluation spatiale et environnementale de technologies de gestion des déchets sur les sites d'accueil potentiels de l'Île de Montréal. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Canada.
- [49] VILLE DE MONTRÉAL (1991). Le défi Déchets - un défi d'avenir. Énoncé d'orientation pour une gestion intégrée des déchets solides et des matières récupérables à la Ville de Montréal.
- [50] VILLE DE MONTRÉAL (1994). Le défi Déchets - Billan des activités 1993 et perspectives 1994.
- [51] WIERZBICKI ANDREJ P. (1979). "The use of reference objectives in multiobjective optimization", Lecture notes in economics and mathematical systems, 177, 468-486.

- [52] WIERZBICKI ANDREJ P. (1977). "Basic properties of scalarizing functionals for multiobjective optimization", Mathematische operations forschung und statistik, ser. optimization, vol. 8(1), 55-60.
- [53] YOUNG, R.N. et ELEKTOROWICZ, M. (1991). Localisation des sites alternatifs potentiels pour l'implantation de nouvelles installations de gestion des déchets, Volume 1 et Volume 2, Centre de recherche géotechnique de l'Université McGill, Montréal.
- [54] YURTERI COSTON and SIBER SEMRA (1982). "An application of locational models for transfer stations", Appropriate waste management for dev. contries, 7-14 juillet.